



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



"1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar"

Cuernavaca, Morelos, a 28 de mayo de 2019.

DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS
DIRECTORA INTERINA DEL CIICAp
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "Propuesta de diseño de un sistema para la generación de energía eléctrica a partir de la generación de hidrógeno *in situ* empleando residuos de aluminio y la conversión del calor de desecho producido, en energía eléctrica" que presenta el alumno **Alberto Arturo Osorio Sandoval**, para obtener el título de la **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ	APROBADO	
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ	Aprobado	
DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ		
DR. SERGIO ALBERTO GAMBOA SÁNCHEZ		
DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

ECMC*MLGE/nmc.

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209.
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 6212 / correo: merle.garcia@uaem.mx

**UA
EM**

CS

Scanned with
CamScanner

Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023

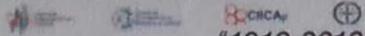


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



"1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar"

Cuernavaca, Morelos, a 28 de mayo de 2019.

DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS
DIRECTORA INTERINA DEL CIICAp
PRESENTE

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "Propuesta de diseño de un sistema para la generación de energía eléctrica a partir de la generación de hidrógeno *in situ* empleando residuos de aluminio y la conversión del calor de desecho producido, en energía eléctrica" que presenta el alumno **Alberto Arturo Osorio Sandoval**, para obtener el título de la **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ		
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ		
DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ		
DR. SERGIO ALBERTO GAMBOA SÁNCHEZ	APROBADO	
DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS		

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

ECMC*MLGE/nmc.

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209.
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 6212 / correo: merle.garcia@uaem.mx



Scanned with
CamScanner

Una universidad de excelencia

RECTORIA
2017-2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Propuesta de diseño de un sistema para la generación de energía eléctrica a partir de la generación de hidrógeno *in situ* empleando residuos de aluminio y la conversión del calor de desecho producido en energía eléctrica

**TESIS PARA LA OBTENER DEL GRADO DE:
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**

ALBERTO ARTURO OSORIO SANDOVAL

DIRECTORES DE TESIS Y SINODALES: Dr. Alberto Álvarez Gallegos.

Dr. Sergio Alberto Gamboa Sánchez.

Dra. Susana Silva Martínez.

Dr. Armando Huicochea Rodríguez.

Dr. José Alfredo Hernández Pérez.

CUERNAVACA, MORELOS MAYO 15, 2019.



RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados del diseño de una planta piloto a escala laboratorio para la producción de hidrógeno a partir la reacción exotérmica de la hidrólisis de aluminio, acoplada a una celda de combustible de intercambio protónico (PEMFC).

La materia prima alimentada al proceso consiste en una solución de hidróxido de sodio y aluminio proveniente de latas de desecho.

El hidróxido de sodio permite retirar la capa de óxido que pasiva al metal; proceso conocido como activación alcalina.

El diseño se basó en el análisis del balance de masa y energía, su comprobación experimental y los requerimientos de combustible de la PEMFC, adicionalmente se consideró el aprovechamiento del calor liberado por la reacción mediante el efecto Seebeck.

La planta está integrada por un contenedor que abastece solución de hidróxido de sodio a un reactor tipo batch, el cual entrega el gas producido a una columna de adsorción de NaOH.

Los tres componentes funcionan como sistema de almacenamiento temporal del combustible en tanto es entregado a una presión regulada y bajo demanda a la PEMFC.

El contenedor de 0.45 L almacena solución al 4.13 M suficiente para hacer reaccionar 10 g de aluminio que producirá 12 L NTP (Normal Temperature and Pressure) de hidrógeno.

El reactor de 2.1 L tiene la forma de un prisma rectangular para acoplar a su superficie placas Peltier que funcionan como convertidores de calor a electricidad.

La propuesta se construirá en versión planta piloto a escala laboratorio en acero inoxidable para evaluar la eficiencia energética global de la planta.

Palabras claves: PEM fuel cells, Hydrolysis of aluminum, wasted aluminum cans, hydrogen production plant, Sebeck effect.

ABSTRACT

This work shows results of a pilot plant designed to laboratory scale to produce hydrogen from a hydrolysis of aluminum exothermic reaction, coupled to a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC).

The raw material fed in this process consists in sodium hydroxide solution and the aluminum came from wasted cans.

Sodium hydroxide allows to remove the oxide layer that passivates the metal; Process known as alkaline activation.

The design was based in mass and energy balance analysis, its experimental verification and fuel requirements of the PEMFC, the exploitation of the heat released by reaction through the Seebeck effect was also considered.

The plant is composed by a container that supplies hydroxide sodium solution to the batch reactor, which delivers the gas produced to an adsorption column of NaOH.

These three components work as a temporary storage system of the fuel while it is provided at a regulated pressure and demand to the PEMFC.

The container of 0.45 L stores solutions at 2.13 M which is enough to react with 10 g of aluminum to produce 12 L of hydrogen into NTP.

The 2.1 L reactor is shaped into a rectangular prism to place in its surface Peltier plates that work as converters of heat to electricity.

The proposal will be built as a pilot plant version at laboratory scale in stainless steel to evaluate plant global energy efficiency.

Keywords: PEM fuel cells, Hydrolysis of aluminum, wasted aluminum cans, hydrogen production plant, Sebeck effect.

AGRADECIMIENTOS.

Siempre mi más profundo agradecimiento a Félix Loyola Morales, perteneciente al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), por dirigir los trabajos teóricos y experimentales a lo largo del desarrollo de la presente investigación. Mis su vision y retroalimentación, no habría logrado el avance del trabajo en la dirección correcta.

Este trabajo jamás lo habría logrado realizar hasta su término son el apoyo constante de Ofelia Melchor Vargas, quien nunca cejó en su esfuerzo por lograr mi objetivo de ser Maesro en Energía Sustentable.

Igualmente, mi más profundo agradecimiento a Guillermina Meza Rosales por simper esforzarse en ver y transmitirme las áreas de oportunidad en las que debía siempre tomar en cuenta para el logro de éste objetivo.

Y en memoria a Isabel Sandoval Pallares, mi madre, quien, gracias a su constante esfuerzo, me permite lograr cada uno de mis objetivos, incluyendo la obtención del presente grado de maestría.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	1
Introducción	2
Justificación	8
Hipótesis	9
Objetivo	9
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	10
2.1 Residuos electrónicos	10
2.2. Composición de los residuos electrónicos	11
2.3. Residuos electrónicos a nivel global	14
2.4. Implicaciones ambientales y de salud	15
2.5 Generalidades del plomo (Pb)	18
2.6 Plomo (Pb) como contaminante al medio ambiente y a la salud	19
2.7 Estructura y composición de tarjetas de circuitos impresos	20
2.7.1 Generalidades de las tarjetas de circuitos impresos.....	20
2.7.2 Estructura de las tarjetas de circuitos impresos	20
2.8 De un residuo peligroso al reciclado de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.....	22
2.9 Técnicas de recuperación de metales en la basura electrónica	26
2.10 Procesos físicos de recuperación de metales	26
2.10.1 Procesos de alta temperatura	27
2.10.2 Procesos hidrometalúrgicos y purificación	29
CAPÍTULO 3: DESARROLLO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL.....	32
3.1 Cálculos Teóricos	33
3.1.1 Ecuación química de Interés para la producción de hidrógeno.....	33
3.1.2 Producción de hidrógeno	33

3.1.3 Energía de reacción en la generación de hidrógeno	35
3.1.4 Temperatura alcanzada por la reacción de producción de hidrógeno	37
3.1.5 Presión generada por el hidrógeno producido	40
3.2 Pre-tratamiento del Aluminio.	41
3.3 Producción de hidrógeno en matraz y su cuantificación.	42
3.4 Análisis de la mejor propuesta técnica para la separación del NaOH de la corriente de gas generada a partir de 3.1.1.[1].....	44
3.5 Separación del hidróxido presente en la corriente de gas a partir de 3.1.1.[1], mediante columna de adsorción.	46
3.5.1.1 Agua en columna como adsorbente de hidróxido de sodio	47
3.5.1.2. Columna de agua con agente mecánico de adsorción.	48
3.5.2. Silicato de alúmina como adsorbente de humedad.	50
3.5.2.1. Activación de la Silicato de alúmina.	50
3.5.2.2 Procedimiento para la separación de humedad mediante silicato de alúmina en columna de adsorción.	50
3.6 Efecto Seebeck.	52
3.6.1 Pruebas de torque	53
3.6.2 Selección de las dos TEM de mejor rendimiento eléctrico	55
3.6.3 Caracterización de las TEM con mejor rendimiento eléctrico	56
3.7 Prueba de hermeticidad del reactor	57
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
4.1 Resultados teóricos.....	62
4.1.1 Producción de hidrógeno	62
4.1.2 Energía de reacción en la generación de hidrógeno	64
4.1.3 Temperatura alcanzada por la reacción de producción de hidrógeno	65
4.1.4 Presión del gas generado dentro del reactor	65
4.2 Producción de hidrógeno en matraz y su cuantificación.	65
4.3 Análisis de la mejor propuesta técnica para la separación del NaOH de la corriente de gas generado a partir de 3.1.1.[1].....	80
4.4 Separación del hidróxido presente en la corriente de gas, mediante columna de adsorción.	81
4.4.1 Agua como adsorbente de hidróxido de sodio	81

4.4.2 Columna de agua con agente mecánico de adsorción	83
4.4.3 Silicato de alúmina como adsorbente de humedad	83
4.5 Efecto Siebeck.....	85
4.5.1 Pruebas de Torque	85
4.5.2 Selección de las dos TEM de mejor rendimiento eléctrico	86
4.5.3 Caracterización de las TEM con mejor rendimiento eléctrico	87
4.6 Pruebas de hermeticidad del Sistema de Producción de hidrógeno	88
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA	92

índice de tablas

Tabla 1.1 Composición de un PC y un monitor de 14 pulgadas	5
Tabla 2.1 Componentes y ubicación de la computadora	14
Tabla 2.2 Relación entre los materiales presentes en los aparatos electrónicos y el daño que estos pueden provocar en la salud humana y el medio ambiente	19
Tabla 2.3 Características generales del Plomo (Pb).	21
Tabla 2.4 Tipos de sustratos de tarjetas de circuitos impresos y su composición.	24
Tabla 2.5 Características de los sustratos.	25
Tabla 2.6 Composiciones de material representativo de las tarjetas de circuitos impresos	27
Tabla 2.7 Legislación Ambiental de los AREE.	30
Tabla 2.8 Composición de las tarjetas de circuitos impresos.	34
Tabla 4.1 Fragmento de valores críticos	60
Tabla 4.2 Criterios de aceptación	63

índice de figuras

Figura 1.1 Esquema de la Legislación Nacional sobre Residuos Electrónicos	7
Figura 2.1 Materiales presentes en una computadora	13
Figura 2.2 Estructura de un sustrato de tarjeta de circuito impreso de doble lado con revestimiento de cobre	23
Figura 2.3 Secuencia de las principales etapas involucradas en el reciclaje de metales	34
Figura 2.4 Partículas metálicas (a) y no metálicas (b) sobre el tambor rotatorio.....	36
Figura 2.5 Parámetros de operación (a) del separador electrostático corona de laboratorio (b)....	37
Figura 2.6 Diagrama de flujo para el beneficio de polvos de tarjetas de circuitos impresos molidas	38
Figura 2.7 Proceso de reciclaje de metales preciosos a partir de TCl	41
Figura 3.1 Ácido clorhídrico y nítrico (agua regia)	45
Figura 3.2 Tarjeta de circuitos impresos	46
Figura 3.3 Fotografía de la licuadora usada en la reducción de tamaño	47
Figura 3.4 Fotografía de tarjeta de circuitos impresos después de la reducción de tamaño en la licuadora	47
Figura 3.5 Molino de mano usado para pulverizar la tarjeta electrónica	48
Figura 3.6 Fotografía de una muestra de tarjeta de circuitos impresos pulverizado	48
Figura 3.7 Equipo de espectrofotometría de absorción atómica (tomado del laboratorio de análisis industriales, UAEM,FCQel).	49
Figura 4.1 Metodología para la recuperación de metales a nivel de laboratorio	53
Figura 4.2 Metodología para la extracción con disolventes orgánicos	54
Figura 4.3 Reacción con agua regia	56
Figura 4.4 Liberación de vapores	56
Figura 4.5 Filtración después de la digestión	57
Figura 4.6 Espectrómetro de absorción atómica	58

Figura 5.1 Cambio de la concentración de plomo total durante las lixiviaciones realizadas con 200 ml de 1 M Cit ³⁻ a 20 g de copelas con pH de: 2 (■), 3(▲) y 4(●)	67
Figura 5.2 Cambio de la concentración de plomo total durante las lixiviaciones realizadas con 200 ml de 1 M Cit ³⁻ a 20 de copelas con pH de: 5(+), 7(x) y 3(—).	67
Figura 5.3 Comparación de la cantidad de plomo soluble durante las lixiviaciones realizadas con 1 M de Cit ³⁻ a pH 5 a 20 g de copelas: copelas(+) y escorias (◆).	69
Figura 5.4 Cambio de la concentración de plomo soluble durante el electro depósito en un reactor de cilindro rotatorio. Condiciones: 300 ml de solución lixivante, potencial de celda 3.3 V, velocidad de rotación 400 rpm	70
Figura 5.5 Influencia del pH en la disolución de plomo	71
Figura 5.6 Influencia de la concentración de agua regia en la disolución de plomo	72
Figura 5.7 Influencia de la razón en la disolución de plomo	73

CAPÍTULO 1

Antecedentes

Revisión bibliográfica.

Las cantidades de equipos electrónicos, incluyendo computadoras, monitores, impresoras y celulares, están creciendo de manera exponencial durante las dos últimas décadas. Desde el lanzamiento de la primera computadora personal en 1981 hasta el año 2008 se han producido un billón de computadoras [1].

A pesar de los beneficios innegables de las tecnologías de información y la comunicación, no se debe olvidar la contaminación medioambiental que pueden causar las mismas al final del ciclo de su vida útil. Muchas computadoras y celulares terminan en la basura común, donde sus sustancias peligrosas como arsénico y plomo entran en el agua subterránea intoxicando los terrenos alrededor de los vertederos. Si bien el reciclaje de los residuos electrónicos es un ámbito de negocio lucrativo por la gran cantidad de metales preciosos que contienen, en muchos países faltan tanto reglamentaciones específicas como iniciativas empresariales para su tratamiento sustentable [1].

Los residuos electrónicos son, en términos generales, diversos equipos eléctricos y electrónicos que han perdido cualquier valor para sus dueños [2].

Esta categorización parece estar en proceso de convertirse en un estándar ampliamente aceptado. La “Ordenanza para el Retorno, Recogida y Eliminación de Aparatos Eléctricos y Electrónicos”, de Suiza, de 1998, distingue entre las siguientes categorías de RAEE:

- Aparatos electrónicos de entretenimiento;
- Aparatos que forman parte de oficinas, equipos de informática y telecomunicaciones;
- Electrodomésticos;
- Componentes electrónicos de los (anteriores) aparatos [1].

Uno de los principales desechos electrónicos son las computadoras, que no son más que “un aparato digital completo en el que se pueden crear e imprimir documentos de texto; crear, manipular e imprimir imágenes; organizar información en base de datos; comunicarse por medio de redes; jugar, ver y editar video digital” [3].

De acuerdo con las cifras que presenta un estudio de Prince, los volúmenes aproximados de consumo de PC en LAC indican que alrededor de 94.674.000 de equipos fueron vendidos entre 1983 y 2005, lo que le permite estimar que se generaron 439.825,7 toneladas de residuos electrónicos [4].

Por su parte, en su estudio sobre la generación de residuos electrónicos en Chile, Steubing estima que unos 300 mil equipos de escritorio y computadores portátiles pasaron a ser residuos; mientras para el año 2020 la generación de equipos obsoletos llegará a 1,7 millones anuales. Lo anterior implica que la cantidad de desechos producidos anualmente se triplicará desde 7 mil toneladas durante 2007 a 20 mil toneladas en 2020 [5].

“Para 2020 —señala Steubing— habrá 215 mil toneladas de residuos electrónicos, las que contendrán en su conjunto 2 toneladas de arsénico (suficiente para contaminar 225 millones de litros de agua para beber), 3 toneladas de mercurio, y casi 10 mil toneladas de plomo”.

El corazón de la mayoría de los aparatos electrónicos consiste en una Placa de Circuito Impreso (PCI) que resulta tan ingeniosa como tóxica. El tóxico a menudo se esparce por fuera, una vez que se ha acabado el producto [5].

Las computadoras y, otros productos electrónicos modernos, contienen diversos elementos potencialmente tóxicos incluyendo antimonio, arsénico, níquel, zinc mercurio, plomo, cadmio, berilio, cromo y bario. Además, algunas sustancias utilizadas para reducir el grado de inflamabilidad de los productos electrónicos representan riesgos potenciales, particularmente los éteres bifenílicos polibromados (PBDEs) [6, 7].

Estas sustancias pueden bioacumularse en los tejidos grasos de los seres vivos y los diversos compartimentos ambientales y representan un riesgo potencial a la salud

humana cuando se liberan como resultado de actividades de reciclaje informal o cuando se disponen en tiraderos a cielo abierto o en sitios no controlados [8,9].

Los desechos electrónicos generalmente están constituidos por: polímeros en un 30% (plásticos), óxidos refractarios en un 30% (cerámicos) y por metales en un 40% [53].

A su vez a los metales presentes en la chatarra electrónica se les puede dividir en dos grupos: [10].

1) Metales Básicos

- Cobre del 20% al 50%
- Hierro del 8% al 20%
- Níquel del 2% al 5%
- Estaño del 4% al 5%
- Plomo aproximadamente 2%
- Aluminio del 2% al 5%
- Zinc del 1% al 3%

2) Metales preciosos

- Oro de 170g a 850g aproximadamente el 0.1%
- Plata de 198g a 1698g aproximadamente el 0.2%
- Paladio de 3g a 17g aproximadamente el 0.005%.

La Tabla 1.1 indica la composición de un PC y un monitor de 14 pulgadas, que entre ambos pesan 27 kg [1].

Tabla 1.1 Composición de un PC y un monitor de 14 pulgadas.

Elemento	Contenido (porcentaje en peso total)	Peso (en kilogramos)	Eficiencia actual de reciclado (en porcentaje)
Plásticos	22,991	6.260,00	20
Plomo	6,299	1.724,00	5
Aluminio	14,172	3.856,00	80
Germanio	0,0016	<0,1	0
Galio	0,0013	<0,1	0
Acero	20,471	5.580,00	80
Estaño	1,008	0,272	70
Cobre	6,928	1.905,00	90
Bario	0.031	<0,1	0
Níquel	0,850	0,51	80
Zinc	2,204	1,32	60
Tantalio	0,016	<0,1	0
Indio	0,0016	<0,1	60
Vanadio	0,0002	<0,1	0
Berilio	0,0157	<0,1	0
Oro	0,0016	<0,1	99
Europio	0,0002	<0,1	0
Titanio	0,0157	<0,1	0
Rutenio	0,0016	<0,1	80
Cobalto	0,0157	<0,1	85
Paladio	0,0003	<0,1	95
Manganeso	0,0315	<0,1	0
Plata	0,0189	<0,1	98
Antimonio	0,0094	<0,1	0
Bismuto	0,0063	<0,1	0
Cromo	0,0063	<0,1	0
Cadmio	0,0094	<0,1	0
Selenio	0,0016	<0,1	70
Niobio	0,0002	<0,1	0
Mercurio	0,0022	<0,1	0
Arsénico	0,0013	<0,1	0
Silicio/vidrio	24,8803	15	0

Fuente: "Microelectronics and Computer Technology Corporation (MCC)", Electronics Industry Environmental Roadmap. Austin, TX: MCC, 1998.

En los países industrializados se ha percibido adecuadamente el problema de la acumulación de desecho tecnológico: la identificación de los elementos tóxicos y la recuperación de materiales de valor en los residuos electrónicos ha sido el principal referente para su gestión final. Actualmente, la mayoría de los países de la región les están aplicando las leyes y reglamentos que rigen para los residuos sólidos y los peligrosos, que resultan totalmente inadecuados en el caso de los residuos electrónicos. Por una parte, las normas aplicables a los residuos sólidos no aseguran un adecuado destino final a los elementos tóxicos que contienen los aparatos electrónicos; y por otra, las leyes sobre residuos peligrosos tienen un alto grado de exigencias en las distintas etapas del proceso hacia el reciclaje (traslado, almacenamiento, etc.), lo cual dificulta el proceso y eleva los costos del reacondicionamiento o disposición final de los equipos computacionales, dificultando las posibilidades de negocio que ellos ofrecen.

El factor detonante de este flujo internacional de residuos electrónicos es su contenido de metales preciosos como oro, plata y cobre. La recuperación de estos metales es un proceso rentable que genera un mercado transfronterizo tanto formal como informal. De hecho, la recuperación de metales preciosos a partir de residuos electrónicos históricamente ha sido uno de los mayores incentivos para la industria del reciclaje si bien los fabricantes de productos electrónicos han reducido gradualmente el contenido de metales en sus productos con la finalidad de reducir costos [11, 12].

Panorama general de los Residuos electrónicos en México

México cuenta con un marco jurídico específico en el tema de residuos que busca asegurar su prevención y gestión integral. La Figura 1.1, muestra el Esquema de la Legislación Nacional sobre Residuos Electrónicos. Los instrumentos que regulan a los residuos electrónicos en particular se sustentan primeramente en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, y de ahí se derivan la Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), los reglamentos correspondientes, así como las Normas Oficiales Mexicanas que se aplican en todo el país [13].

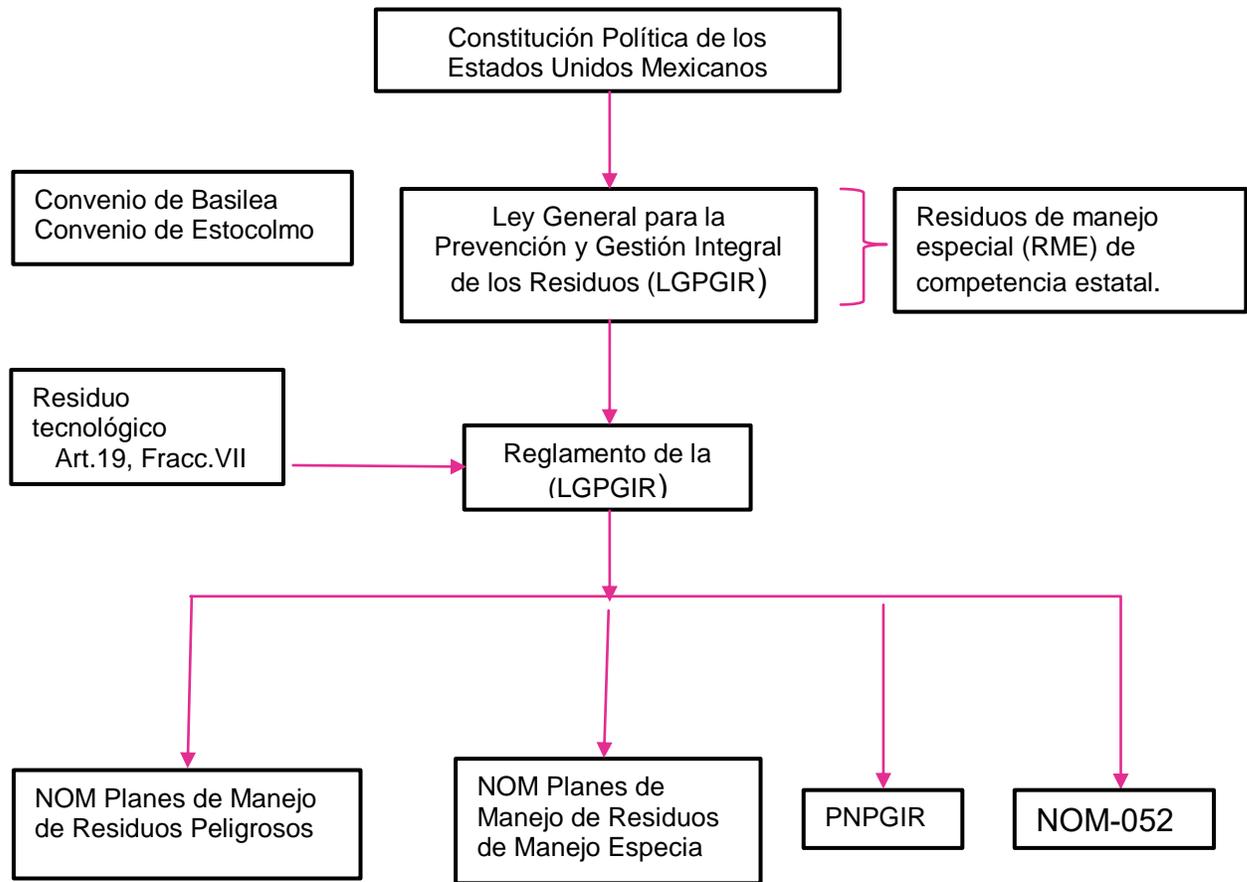


Figura 1.1. Esquema de la Legislación Nacional sobre Residuos Electrónicos

Los residuos electrónicos están definidos por la LGPGIR como de manejo especial de acuerdo al artículo 19 sección VIII, descritos como: residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, de los fabricantes de productos electrónicos y de otros que al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico.

Los residuos de manejo especial (RME) están definidos en el artículo 5 sección XXX como aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos [13].

Justificación.

La caracterización de la reacción de generación de hidrógeno a partir de latas de desecho en un medio básico junto con el análisis de su balance de materia y energía, permite conocer la relación entre la cantidad de reactivos a emplear y la cantidad de energía liberada, la cual se puede emplear una vez convertida en energía eléctrica.

Al emplear aluminio residual en la reacción de generación, se contribuye al reciclaje y disminución de éste residuo sólido municipal.

El hidrógeno así obtenido es empleado para la generación de energía eléctrica mediante el empleo de celdas de combustible, además de captar el calor de reacción y convertirlo en electricidad mediante el efecto Seebeck a través de placas Peltier.

Esto permite el diseño y construcción de un sistema en donde se incrementa la eficiencia global de energía a partir de la producción de hidrógeno considerando dos procesos, a saber, la captación del calor de desecho proveniente de la energía de reacción y el empleo del hidrógeno producido a partir de material de desecho, mediante la integración al sistema de producción de celdas de combustible de intercambio catiónico.

Hipótesis.

El incremento de la eficiencia energética global del proceso de producción de hidrógeno a partir de la reacción en medio básico del aluminio proveniente de latas de desecho, se puede llevar a cabo a partir de la integración de placas Peltier al cuerpo del reactor para captar el calor de reacción y convertirlo en electricidad mediante el efecto Seebeck, en el que al ser expuesto sus componentes bimetálico al calor se induce un potencial eléctrico, generando electricidad adicional a partir de este sistema.

I. Objetivo General.

Diseñar y construir sistema a escala de laboratorio para el incremento de la eficiencia energética global de la producción de hidrógeno, a partir de la hidrólisis de aluminio en medio básico, acoplado a una celda de combustible de intercambio catiónico y mediante el efecto Seebeck, integrando al sistema placas Peltier para la conversión del calor de desecho en electricidad.

II. Objetivos Particulares.

- i. Realizar un análisis y comprobación del balance de materia y energía en la producción de H_2 a partir de la reacción entre aluminio e hidróxido de sodio.
- ii. Propuesta del diseño de un sistema de producción de hidrógeno.
- iii. Caracterización y selección de los dispositivos a emplear para la generación de electricidad.
- iv. Desarrollo de la propuesta del sistema de purificación de H_2 .
- v. Diseñar la secuencia de proceso del sistema: Reactor, columna de adsorción, dosificador de solución de $NaOH$.
- vi. Integración de las placas Peltier al reactor del sistema de producción.
- vii. Integración de la celda de combustible de intercambio catiónico.
- viii. Integración y caracterización del sistema de generación.

CAPÍTULO 2.

Marco teórico

La generación de hidrógeno a partir de la hidrólisis de aluminio en presencia de una solución de hidróxido de sodio tiene una doble vertiente energética a considerar.

Una de ellas es la producción de hidrógeno empleando aluminio de desecho de latas de bebidas, reduciendo la generación de residuos sólidos municipales.

Esta condición permite generar, a bajo costo, hidrógeno como portador de energía, que se emplea para la obtención de electricidad sin la emisión de gases de efecto invernadero y sin requerir el almacenamiento de la especie química generada.

La segunda vertiente es que al ser ésta generación producto de una reacción exotérmica, se puede captar el calor de reacción para transformarlo en electricidad en base al efecto Seebeck y a través de placas Peltier

La energía producida en un sistema que integra estos elementos puede ser portátil con el fin de utilizarla *in situ*.

Según los Lineamientos para la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en Latinoamérica, se define a los residuos electrónicos de la siguiente manera:

“Los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos son residuos derivados de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) descartados por el consumidor al final de su vida útil, cuyas características hacen que sea necesario ser sometidos a un manejo

especial y que deberán ser entregados a un sistema de gestión ambientalmente adecuado” [1].

Los RAEE contienen contaminantes altamente tóxicos entre los que tenemos metales pesados como: plomo, mercurio, berilio, bario y cadmio que pueden ser nocivos para el medio ambiente, ya que son dispuestos en rellenos sanitarios, los lixiviados producidos pueden contaminar el suelo y las fuentes de aguas cercanas [15].

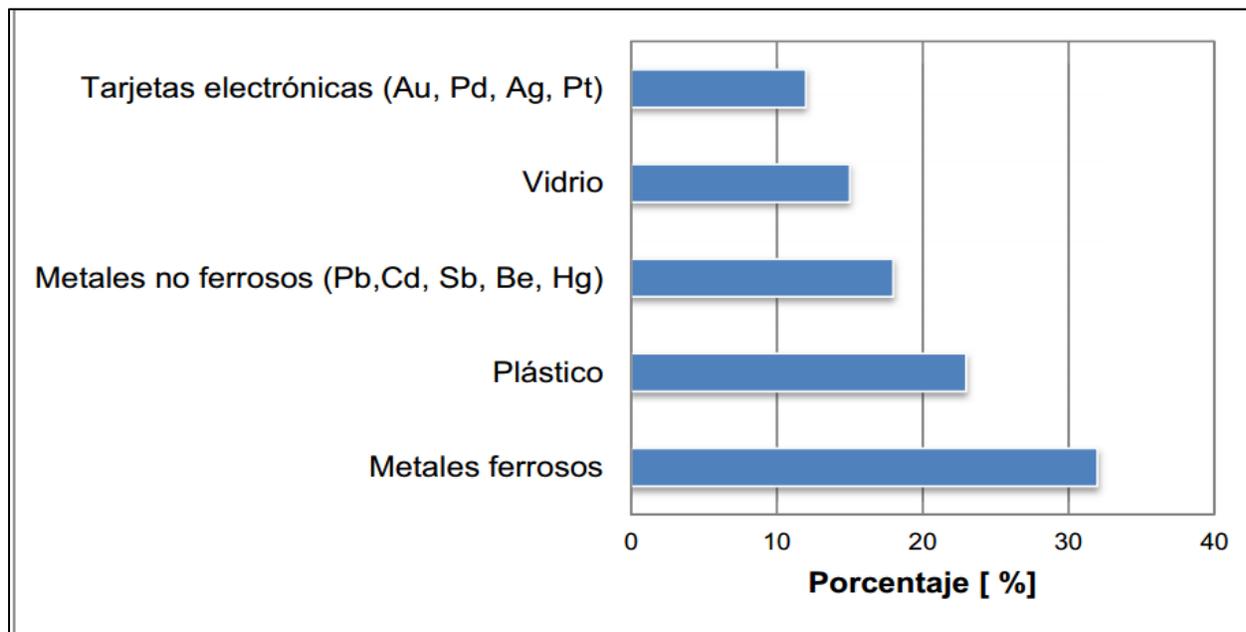
El potencial contaminante de este tipo de material aumenta en la medida que se trabaja con procesos poco técnicos, como los usados en el sector informal de reciclaje para extraer los metales valiosos. Sin embargo en países desarrollados el reciclaje de esos residuos se considera un negocio rentable, ya que con la tecnología adecuada se pueden recuperar todos los componentes valiosos [16].

2.2. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS ELECTRÓNICOS.

La composición de los residuos de equipos electrónicos es muy variada, siendo común en muchos de ellos las placas de circuitos impresos así como diversos componentes eléctricos. Los residuos de placas de circuitos electrónicos presentan cierta problemática a la hora de reciclarlos, principalmente por su composición heterogénea, formada principalmente por material orgánico, metales, y fibras de vidrio. En el año 2002, tan solo se recicló en el Reino Unido, el 15% de las 50.000 toneladas de residuos de circuitos eléctricos generados [17].

Dentro de los residuos electrónicos, las computadoras descartadas son uno de los equipos más ampliamente gestionados en los sistemas de reciclaje RAEE, debido a sus cortos periodos de obsolescencia (tiempo de renovación del equipo) y a la amplia utilización de este tipo de equipos a nivel industrial, empresarial y doméstico [18].

En la Figura 2.1 se representa la composición general de una computadora.



Fuente: Baker, Boumay, Heberlein, Harayama y Rekacewicz, 2004, [19].

Además de los elementos mencionados en la gráfica anterior, las computadoras exhiben una gran gama de metales presentes en las mismas. En la Tabla 2.1 se presentan los componentes de una computadora así como la ubicación de los mismos.

Tabla 2.1. Componentes y ubicación de la computadora.

Nombre	% Respecto al total	Uso/Emplazamiento
Plástico	22,991	Con elementos orgánicos y óxidos distintos al sílice.
Plomo	6,299	Juntas metálicas, escudo anti radiación / tubo catódico (TC), PCB.
Aluminio	14,172	Estructura, conductividad/carcasa, TC, PCB, conectores.
Germanio	0,002	Semiconductor/PCB
Galio	0,001	Semiconductor/PCB
Hierro	20,471	Estructura, magnetismo/carcasa (acero), TC, PCB

Estaño	1,008	Juntas de metal/PCB, tubo catódico
Cobre	6,929	Conductividad /tubo catódico, PCB, conectores
Bario	0,032	Tubo de vacío /tubo catódico
Níquel	0,850	Estructura, magnetismo/carcasa(acero), TC,PCB
Zinc	2,205	Pilas, emisor de fósforo /PCB, tubo catódico
Tantalio	0,016	Condensador /PCB, alimentación
Indio	0,002	Transistor, rectificadores /PCB
Continuación...	0,000	Emisor de fósforo rojo/tubo catódico
Mercurio	0,000	Activador de fósforo verde, impurificadora / TC,PCB
Berilio	0,016	Conductividad térmica/PCB, conectores
Oro	0,002	Conectividad, conductividad /PCB, conectores
Europio	0,000	Activador de fosforo/PBC
Titanio	0,016	Pigmento; agente de aleación /carcasa (aluminio)
Rutenio	0,002	Circuito de resistencia /PBC
Cobalto	0,016	Estructura, magnetismo /carcasa (acero),TC,PCB
Paladio	0,000	Conectividad, conductividad /PCB, conectores
Manganeso	0,032	Estructura, magnetismo /carcasa (acero),TC,PCB
Plata	0,019	Conductividad /PCB, conectores
Antimonio	0,009	Diodos /carcasas, PCB, tubos catódicos
Bismuto	0,006	Agente humectante en película gruesa /PCB
Cromo	0,006	Decoración, endurecedor /carcasa (acero)
Cadmio	0,009	Pilas, emisor de fosforo glugreen /carcasa, PCB,TC
Selenio	0,002	Rectificadores /PCB
Niobio	0,000	Elemento soldador /carcasa
Platino	0,000	Conductor de película gruesa / PCB
Mercurio	0,002	Pilas, interruptores /carcasa, PCB
Arsénico	0,001	Agentes impurificadores en transistores /PCB
Sílice	24,880	Cristal, dispositivos en estado sólido / TC,PCB

(RECYCLA Chile S.A, [20])

Por otro lado, los materiales poliméricos que forman parte de este residuo, son principalmente el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y el Poliestireno de Alto Impacto (HIPS), usados sobre todo en las carcasas exteriores de los equipos electrónicos ya que proporcionan una alta resistencia al impacto y una excelente apariencia. Otros componentes de esta fracción son el Óxido de Polifenol (PPO) por su resistencia a altas temperaturas y el Polietileno y el PVC por sus buenas propiedades como aislantes eléctricos [21].

2.3. RESIDUOS ELECTRÓNICOS A NIVEL GLOBAL

La producción y la utilización de aparatos y equipos electrónicos aumenta de manera acelerada a nivel mundial en todos los ámbitos en los que se desenvuelve el ser humano, de ahí que la industria electrónica y principalmente la de producción de aparatos constituye actualmente el sector de mayor crecimiento en los países desarrollados.

Pero así como el aumento del consumo de los aparatos electrónicos ha sido vertiginoso a nivel mundial, así también ha ido aumentando la producción de desechos de este tipo de productos ocasionado por la sustitución, renovación o eliminación paradójicamente por el desarrollo de los mismos [10].

En un estudio de la Iniciativa StEP (Standard for the Exchange of Product model data), según los datos recopilados, para 2017 el volumen anual de basura electrónica será de 65,4 millones de toneladas, también señaló que en 2012, China y Estados Unidos se situaron a la cabeza de los países que más equipos electrónicos y eléctricos fabrican, además de los que generaron más basura electrónica. China generó 11,1 millones de toneladas de equipos electrónicos mientras que Estados Unidos le siguió con 10 millones de toneladas. En cuanto a basura electrónica: Estados Unidos ocupó el primer lugar, con 9,4 millones de toneladas, mientras que China fue el segundo con 7,3 millones de toneladas.

En Latinoamérica, Brasil y México fueron los países que generaron más basura electrónica. Brasil puso en el mercado en 2012 dos millones de toneladas de equipos electrónicos y eléctricos, y generó 1,4 millones de toneladas de basura electrónica.

Mientras México puso en el mercado 1,5 millones de toneladas de equipos eléctricos y electrónicos y generó 1 millón de toneladas de basura electrónica.

En Europa, España puso en el mercado 1,1 millones toneladas métricas de equipos eléctricos y electrónicos y generó 832 toneladas de basura electrónica [22].

Si bien la cantidad de PC que se eliminan es tan solo una fracción de todos los residuos electrónicos en el mundo, en 1994 se estimaba que aproximadamente 20 millones de PC (cerca de 7 millones de toneladas) quedaron obsoletas. Hacia 2004, esa cifra se había incrementado a más de 100 millones de PC. En cifras agregadas, cerca de 500 millones de PC alcanzaron el fin de su vida útil entre 1994 y 2004. Quinientos millones de PC contienen aproximadamente 2'872'000 toneladas de plástico, 718'000 toneladas de plomo, 1'363 toneladas de cadmio y 287 de mercurio [23].

Este flujo de desechos cada vez mayor se está acelerando, dado que el mercado global de PC está lejos de saturarse y el ciclo de vida de un PC está acortándose rápidamente [24].

2.4. IMPLICACIONES AMBIENTALES Y DE SALUD

La incipiente industria de residuos electrónicos se basa principalmente en un proceso de desensamblaje profesional, en la venta de ciertos metales y plásticos en el mercado local y en las posibilidades de comercialización internacional con empresas especializadas en la recuperación de metales preciosos, cuyas sedes se encuentran principalmente en países industrializados o en Asia.

Entre los posibles riesgos en este “emergente negocio” están el interés económico como mayor que las responsabilidades medioambientales, que sirva para nuevas concentraciones económicas, y que geste nuevos monopolios en el área.

La ausencia de fiscalización sobre estas iniciativas, o las limitaciones en el control de esta basura electrónica, han permitido que el sector que trabaja el reciclaje de residuos electrónicos lo haga en condiciones de difundida informalidad [1].

El principal objetivo de dicha exportación de residuos electrónicos, es evadir los procesos de reciclaje a los que se debe someter los REE en dichos países y que presentan un costo mucho mayor que el destinarlos a países en desarrollo.

Los principales países a los que se exportan residuos electrónicos son: China, Pakistán e India. El principal problema radica en los ineficientes y altamente perjudiciales procesos de reciclaje que se practican en el sector informal dentro de estos países. [25].

Como consecuencia recicladores informales buscan metales preciosos como el oro, la plata y el cobre presentes en los RAEE. Aplican métodos y herramientas rudimentarias para separar estos metales de los complejos componentes y subensambles de RAEE. Dentro de las actividades más riesgosas se encuentran el calentamiento de placas de circuito impreso a llama abierta para desoldarlas, el tratamiento de paneles de circuito impreso (PCI) en baños de ácido para recuperar el oro y otros metales valiosos, la quema al aire libre de cables y alambres recubiertos en PVC para recuperar el cobre, los métodos destructivos para separar los materiales en los tubos de rayos catódicos (TRC), y la quema de residuos al aire libre para recuperar metales. Además, los descartes resultantes de estas operaciones son directamente desechados en los suelos y cursos de agua cercanas.

Las condiciones de trabajo del sector, que no ofrecen ninguna protección, o muy escasa, son perjudiciales tanto para la salud y la seguridad de los trabajadores como para la de las comunidades cercanas, se encontraron altas concentraciones de polibromodifeniléteres (PBDE) en muestras de sangre de seres humanos que realizan esta actividad, así como retardante de llama bromado más utilizado BDE-20. También preocupan los altos niveles de plomo en sangre encontrados en los niños, y el daño potencial a su CI y al desarrollo de su sistema nervioso central como consecuencia de ello [26].

El enorme volumen de RAEE generado hoy, constituye un problema ambiental emergente, estos productos obsoletos se convierten en residuos potencialmente peligrosos y de alto impacto al medio ambiente. En particular, en un relleno sanitario, los RAEE sufren procesos de lixiviación que generan soluciones contaminantes del suelo y el agua. Por otro lado, mediante el proceso de incineración se generan dioxinas brominadas, furanos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos aromáticos polihalogenados, cloruro de hidrógeno, y metales pesados que son fuente de distintos

riesgos ocupacionales por inhalación. Además de potencial riesgo ambiental por emisión a la atmósfera [27].

En la Tabla 2.2 se presenta un listado de la relación de los componentes presentes en los aparatos electrónicos con los daños que provocan en la salud humana y el medio ambiente.

Tabla 2.2. Relación entre los materiales presentes en los aparatos electrónicos y el daño que estos pueden provocar en la salud humana y el medio ambiente.

Material	Daño Potencial a la Salud Humana	Daños Potenciales al Medio Ambiente
Ba	Edema cerebral, debilidad muscular, aumento en la presión sanguínea daño hepático.	El Bario permanece en la superficie del suelo o en los sedimentos de agua. Si organismos acuáticos lo absorben puede acumularse en sus cuerpos.
Be	Las sales del berilio son tóxicas y la exposición prolongada podría generar cáncer. La beriliosis ataca los pulmones.	Algunos compuestos de Berilio se disuelven en el agua, pero la mayor se adhiere al suelo
Ca	Daños irreversibles en los riñones y en los huesos.	Bioacumulativo, persistente y tóxico para el medio ambiente.
Cr V I	Reacciones, bronquitis asmáticas y alteraciones en el ADN	Las células lo absorben muy fácilmente. Tiene efectos tóxicos.
Hg	Posibles daños cerebrales y tiene impactos acumulativos.	Disuelto en agua, se va acumulando en los organismos vivos.
Ni	Puede afectar a los sistemas endocrinos, inmunológicos y respiratorios.	Puede dañar los microorganismos si estos exceden la cantidad tolerable.

Continuación...

Retardantes de flama bromados.	Cancerígenos y neurotóxicos. También puede interferir con la función reproductora.	En los vertederos son solubles, en cierta medida volátiles, biacumulativos y persistentes. Al incinerarlos se generan dioxinas y furanos.
--------------------------------	--	---

[RECYCLA, Chile S.A]

2.5 GENERALIDADES DEL PLOMO (Pb)

El plomo, es un elemento químico, situado en el grupo 14 de la tabla periódica de los elementos químicos, es un metal de mayor importancia económica, es un sólido blando suave y maleable con gran facilidad para ser fundido, para generar alambres y para extruirlo, es de color negro grisáceo y denso que se encuentra de manera casi exclusiva como sulfuro de plomo (II), el mineral galena.

El plomo es un producto muy importante en la industria moderna, los principales usos de este metal y sus compuestos son: en baterías, pigmentos, aleaciones, cerámica, plásticos, municiones, soldaduras, cubiertas de cables, plomadas y armamento. También se usa en la elaboración de equipo usado en la fabricación de ácido sulfúrico, en el refinamiento de petróleo, reacciones de halogenación y sulfonación. Hoy día, cerca de la mitad de los 6 millones de toneladas que se utilizan anualmente proviene del reciclaje. Tanto el plomo, como sus compuestos son venenos acumulativos por lo que deben manipularse con mucho cuidado, no ponerse en contacto con alimentos, ni otras sustancias que serán ingeridas; es muy tóxico, por lo que la mejor solución consiste en reciclar el metal [28].

La Tabla 2.3, muestra las características generales del Plomo.

Tabla 2.3. Características generales del Plomo (Pb).

NOMBRE:	PLOMO
Símbolo Químico	Pb
Número Atómico	82
Valencia	2,4
Densidad	11.35 (g/ml a 20 °C)
Masa Atómica (g/mol)	207.2 (g/mol)
Estado de Oxidación	+4,+2
Punto de Ebullición (°C)	1770
Punto de Fusión (°C)	327.4

2.6 PLOMO (Pb) COMO CONTAMINANTE AL MEDIO AMBIENTE Y A LA SALUD

Al destacar los efectos adversos de los residuos de la tecnología, cuestionamos el estatus de uno de los más peligrosos elementos que alberga la basura electrónica, el plomo (Pb) es el quinto elemento más utilizado después de metales de hierro, aluminio, cobre y zinc. Es comúnmente usado en los aparatos eléctricos y electrónicos en la industria de soldadura, baterías de plomo, componentes electrónicos, cable de revestimiento, en el vidrio de un CRT etc.

Entre los daños potenciales a la salud se tienen daños al sistema endocrino y cardiovascular, así como vómitos, diarrea, convulsiones, coma o incluso la muerte. Otros síntomas son pérdida de apetito, dolor abdominal, estreñimiento, fatiga, insomnio, irritabilidad y dolor de cabeza. La continua exposición excesiva, como en un entorno industrial, puede afectar los riñones. Es especialmente peligrosa para niños pequeños porque puede dañar las conexiones nerviosas y causar sangrado y trastornos cerebrales [29].

Esta sustancia puede ser peligrosa para el ambiente; aire y agua. En la cadena alimenticia referida a los seres humanos tiene lugar bioacumulación, concretamente en vegetales y organismos acuáticos, especialmente en los peces; ese plomo lo absorbemos cuando esa pantalla va a un tiradero en el campo, en el suelo, a lo largo de

los años se desintegra y, cuando llueve, pasa a los mantos freáticos. Eventualmente, a largo plazo, tomaremos agua de ahí, entonces nos llegará el plomo al organismo [10].

2.7 ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DE TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

En esta sección se exhibe la composición y estructura de los componentes electrónicos usados en el proceso de investigación. Las tarjetas de circuitos impresos de las cuales se tratara en esta sección provienen de computadoras.

2.7.1 GENERALIDADES DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS.

Los circuitos electrónicos siempre se construyen sobre un circuito impreso. Todos los productos electrónicos tienen un circuito impreso de diseño propio. Las tarjetas madre son la principal tarjeta de circuitos impresos dentro de las computadoras modernas. En ella se encuentran las conexiones para los diferentes dispositivos periféricos como son: tarjetas de memoria RAM, tarjetas de sonido, discos duros, fuente de poder, etc. Los PCBs (Printed Circuit Board), poseen la mayor cantidad de chip o circuitos integrados, y por ende la mayor cantidad de metales preciosos; en resumen, el circuito impreso es imprescindible para que exista un producto electrónico [30].

2.7.2 ESTRUCTURA DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Una placa de circuito impreso está formada por dos caras; una de ellas la llamada cara de componentes (component side) o sustrato, la otra cara llamada cara de soldadura (solder side), incorpora las pistas de cobre, que sirven como conector para todos los elementos acoplado a la tarjeta. En la Figura 2.2 se presenta la estructura del sustrato de una tarjeta de circuitos impresos.

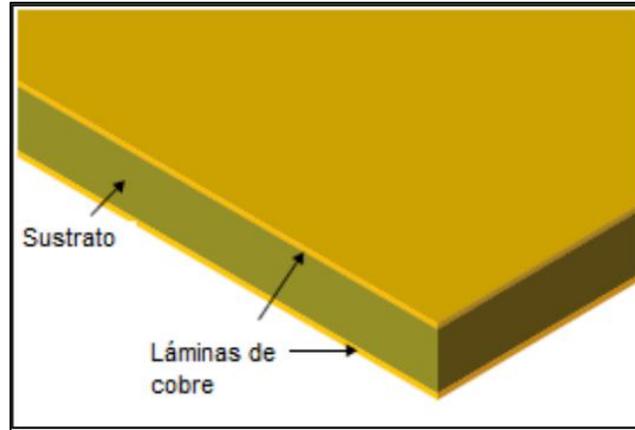


Figura 2.2. Estructura de un sustrato de tarjeta de circuito impreso de doble lado con revestimiento de cobre [30].

En la Tabla 2.4 se muestran los diferentes tipos de sustancias usados en la fabricación de tarjetas de circuitos impresos y su composición. Se puede notar la gran variedad de componentes usados en los sustratos. Es importante que todos los sustratos tipos FR poseen retardantes de flama bromados, lo que ocasiona que se considere residuos peligrosos a las tarjetas de circuitos impresos fabricadas con ese sustrato [30].

Tabla 2.4. Tipos de sustratos de tarjetas de circuitos impresos y su composición

Tipo	Composición
XXXPC	Papel /compuestos fenólicos
FR-3	Papel /compuestos fenólicos
FR-3	Papel / resina Epóxica
FR-4	Fibra de vidrio / resina Epóxica
G-3	Fibra de vidrio / resina Epóxica
G-5	Fibra de vidrio / melamina
G-9	Fibra de vidrio / melamina
G-10	Fibra de vidrio / resina Epóxica
G-11	Fibra de vidrio / resina Epóxica
G-30	Fibra de vidrio / poliamida

En la Tabla 2.5, se muestran algunas de las características de la composición de los sustratos en función con su aplicación

Tabla 2.5. Características de los sustratos.

Nombre	Características
Baquelita	Resistencia a la humedad, Resistencia a cambios de temperatura, Resistencia a disolventes y abrasivos.
Fibra de vidrio	Resistencia térmica, Resistencia mecánica, Resistencia al arco eléctrico, Resistencia a la humedad, Resistencia a cambios de temperatura, Resistencia a disolventes y abrasivos.
Resina Epóxica	Resistencia térmica, Resistencia mecánica, Constante dieléctrica buena.
Politetrafluoretileno PTFE	Resistencia mecánica, Resistencia térmica, Resistencia a disolventes y abrasivos, Constante dieléctrica muy uniforme, soporta temperaturas de 269°C.
PTFE-Fibra cerámica	Resistencia al arco eléctrico.
Diferentes mezclas de ellos	

Kepro Circuit Systems [32]

2.8 DE UN RESIDUO PELIGROSO AL RECICLADO DE RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS.

Desde hace unos años los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, denominados RAEE, se han hecho un hueco en el mundo de los residuos convirtiéndose en un verdadero problema ambiental, recordemos que por “reciclado” no se entiende la re-utilización (recuperación) de un equipo o de sus componentes, sino el procesamiento y re-úso de los materiales constitutivos (plástico, plomo, cobre, vidrio, metales ferrosos y otros). De este proceso surgen como residuos últimos las placas, que no solo contienen

algunos metales valiosos (plata, oro, etc.) sino, y asimismo, algunos de los elementos más contaminantes.

El reciclaje permite tratar previamente los componentes potencialmente peligrosos y evitar así impactos ambientales dañinos y nada deseables que se producirían si los desechamos en vertedero, aprovechar los equipos en desuso, sus partes y sus materiales de un modo que elimine, neutralice o aisle los contaminantes o residuos peligrosos, es el único camino ambientalmente eficiente [34].

La gestión de los RAEE recogidos comienza por los productores, quien fabrica y vende aparatos eléctricos y electrónicos, tiene la obligación de recoger selectivamente y gestionar adecuadamente los aparatos puestos en el mercado para, posteriormente, comunicar a la administración los residuos de aparatos gestionados, por categorías de productos y materiales.

Para facilitar el cumplimiento de estas obligaciones (recogida y correcta gestión ambiental), los fabricantes de equipos eléctricos y electrónicos pueden agruparse constituirse en un Sistema Integrado de Gestión, conocidos como SIG. Respecto a sustancias peligrosas, la legislación obliga a limitar el uso de seis: plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente, PBB y PBDE [34].

A medida que la “red” global se hace más estricta con respecto a las restricciones nacionales en el uso de sustancias peligrosas en electrónica, regiones como América Latina corren riesgo de convertirse en los basurales de los productos más tóxicos [35].

Con el propósito de gestionar los desechos electrónicos, la UNU, el Programa de Medio Ambiente de la ONU, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, algunas Universidades del mundo y empresas como Dell, Microsoft, HP y Philips, crearon la iniciativa “Solucionar el problema de la basura”. “Este proyecto busca, entre otras cosas, homogenizar los procesos de reciclado en el mundo con el fin de que los componentes valiosos sean recuperados” [36].

Los teléfonos, computadoras, televisores y demás aparatos eléctricos y electrónicos, generalmente pasan por un proceso de desarmado manual, seleccionando los componentes que aún pueden ser utilizados en la fabricación de nuevos productos, de la industria electrónica principalmente. “Según Carlos Arizaga gerente de Seguridad y

Medio Ambiente de TCG en México y Brasil: Al residuo se le da un valor en la cadena productiva por lo que automáticamente deja de ser residuo, ya que se le da otro uso y no va a los rellenos sanitarios. Desde el punto de vista ambiental, al entregar los componentes a otros procesos, colaboramos a que la naturaleza no sea explotada” [37]. Sin embargo la infraestructura de recolección y reciclaje se caracteriza por un alto grado de informalidad, que, en un cierto nivel, perdura incluso cuando se pone en operaciones un sistema regulado de gestión de residuos electrónicos. Aunque las empresas de reciclaje formales amplían sus actividades e incrementan las cantidades procesadas cuando se implementa un sistema formal de gestión de residuos electrónicos, los recicladores informales siguen recolectando en los hogares particulares aquellos componentes que tienen valor económico.

En algunos países, como Chile, Argentina, Perú, Colombia y Brasil, las empresas tradicionales de reciclaje de metales han descubierto el mercado de reciclaje de residuos electrónicos. Las cantidades procesadas todavía están en un nivel modesto, dado que ni el marco político ni la infraestructura logística permiten volúmenes mayores. En su mayoría estas empresas no ofrecen un servicio completo, pues prefieren concentrarse en los componentes valiosos, como los paneles de control impresos, descartando un tratamiento final adecuado de componentes como los Tubos de Rayos Catódicos (CRT) u otros componentes de valor económico negativo, pero que implican un daño potencial al medio ambiente o a la salud [1].

El reciclaje de residuos electrónicos postconsumo por lo general es realizado mediante el llamado “reciclaje casero”. Los recicladores informales buscan metales preciosos como el oro, la plata y el cobre presentes en los RAEE. Aplican métodos y herramientas rudimentarias para separar estos metales.

El reciclaje casero no tiene buenos resultados en términos de la conservación de los recursos. Un estudio reciente estima que la eficacia total de un proceso químico húmedo para la recuperación de oro de PCI en la India es del 20%. Esto se compara con el 95% recuperado en una instalación de última generación en la Unión Europea, que puede recuperar no sólo oro sino también otros 16 metales preciosos con menores emisiones totales.

Los descartes resultantes de estas operaciones son directamente desechados en los suelos y cursos de agua cercanas.

Diferentes estudios documentaron la contaminación relacionada con el reciclaje casero. El caso más terrible es el del pueblo de Guiyu, en Guangdong, China. Una serie de investigaciones llevadas a cabo en Guiyu entre 2003 y 2005 encontraron:

1. Elevadas concentraciones de polibromodifeniléteres (PBDE) en muestras de suelo y sedimentos con sustancias similares a varias formulaciones técnicas de productos de retardantes de llama [54].
2. Contaminación del suelo con hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) cancerígenos, mutagénicos, teratogénicos, y bioacumulativos, especialmente en los suelos de los lugares utilizados para la quema de residuos al aire libre [55].
3. Altas concentraciones de metales pesados como cadmio, cobre, plomo, zinc en muestras de sedimentos del río Lianjiang muy por encima de las Valores Provisionales de Calidad de Sedimentos establecidas para los estándares canadienses [56].
4. Concentraciones de algunos metales pesados asociados a particulado fino (PM2.5) en muestras de aire en un rango de 4 a 33 veces más que en las registradas en otras ciudades de Asia [56].

Estos resultados muestran un panorama sobre la contaminación ambiental de las zonas próximas a los sitios de reciclaje de residuos, similar a lo informado en el estudio de estos sitios en China e India. Más recientemente, un experimento en el que se simuló la quema abierta de PCI y de cables recubiertos en PVC dio como resultado altas concentraciones de metales pesados, dioxinas y furanos (tanto clorados como bromados) en las cenizas volátiles y alta capacidad de escape de los metales de las cenizas residuales [54].

Las condiciones de trabajo del sector, que no ofrecen ninguna protección, o muy escasa, son perjudiciales tanto para la salud y la seguridad de los trabajadores como para la de las comunidades cercanas [38].

2.9 TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE METALES EN LA BASURA ELECTRÓNICA

Dada la variada composición metálica de las tarjetas de circuito impreso, se han propuesto diferentes métodos para la recuperación de los distintos metales presentes en ellas, principalmente preciosos como oro y plata. Éstos involucran una combinación de técnicas propias del procesamiento de minerales. Se han estudiado métodos físicos y mecánicos como reducción de tamaño, concentración gravimétrica, separación electrostática y magnética. También métodos que involucran altas temperaturas como fundición o pirólisis.

Los procesos más comunes actualmente involucran técnicas hidrometalúrgicas, en los cuales se realiza lixiviación ácida o básica de metales, extracción por solventes y procesos de intercambio iónico en algunos casos.

En términos generales el reciclaje de metales se desarrolla en tres etapas: recolección, pretratamiento y tratamiento final, donde la eficiencia del proceso es igual al producto de la eficiencia de cada etapa (Figura 2.3) [33].



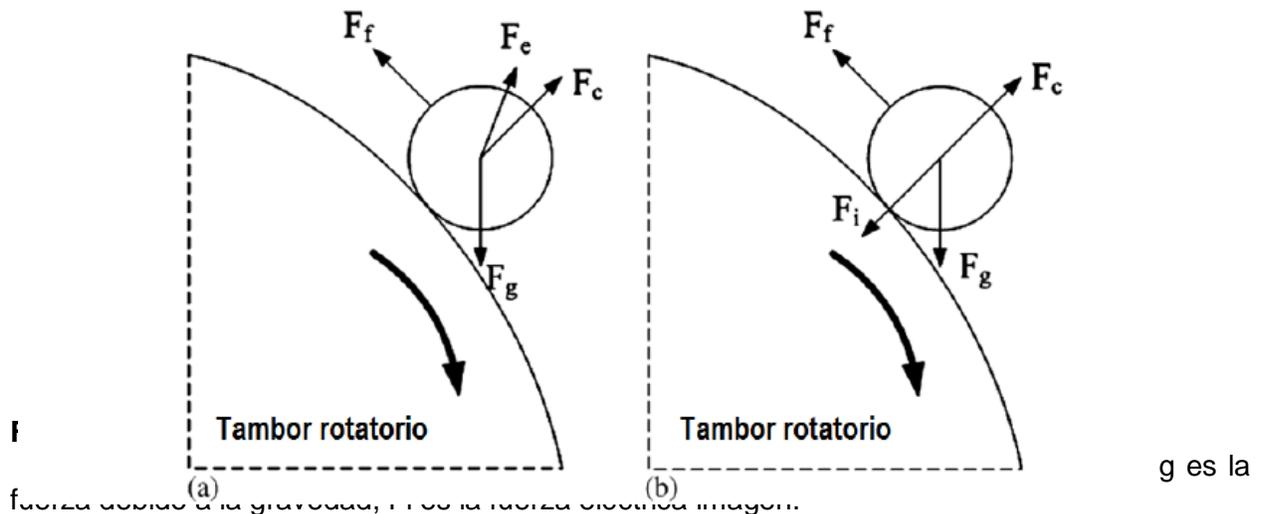
Figura 2.3: Secuencia de las principales etapas involucradas en el reciclaje de metales.

2.10 PROCESOS FÍSICOS DE RECUPERACIÓN DE METALES

Los procesos mecánicos se utilizan usualmente como una etapa de pretratamiento previa a la aplicación de técnicas metalúrgicas. Estos consisten en el desmantelamiento, retiro de elementos peligrosos, reducción de tamaño y concentración de la fracción metálica. Se realiza con el fin de liberar los metales unidos o encapsulados con resina y cerámicos. Con este proceso se garantiza la exposición de los metales para que puedan ser alcanzados por los reactivos utilizados en las reacciones de lixiviación, además de mejorar la velocidad del proceso. Para la concentración se han estudiado métodos físicos como separación magnética y electrostática, flotación, separación neumática, entre otros.

La separación electrostática es una forma ambientalmente responsable para la recuperación de metales a partir de las TCI (tarjetas de circuito impreso).

En la separación electrostática de corona se genera un campo electrostático de alta intensidad por un electrodo corona y un electrodo adicional, como se muestra en la Figura 2.4 (a). Las partículas no metálicas entran en este campo y se someten a inducción electrostática y “bombardeo de iones” (carga corona), respectivamente. Las partículas metálicas se descargan rápidamente al electrodo a tierra, mientras las no metálicas cargadas permanecen “fijas” al tambor rotatorio por la fuerza eléctrica imagen, y se mueven con él, cayendo finalmente al recipiente luego de ser descargadas por la escobilla. Las fuerzas de campo eléctrico actúan de forma diferente sobre las partículas metálicas y no metálicas, como se muestra en la Figura 2.4 (b) [39].



2.10.1 Procesos de alta temperatura

El método pirometalúrgico que consiste de incineración y fundición permite la recuperación efectiva de metales preciosos, Obsérvese la Figura 2.5, muestra los parámetros de operación (a) del separador electrostático corona de laboratorio (b). Sin embargo, el proceso tiene los inconvenientes de producir algunos contaminantes y una escoria con un contenido múltiple de metales de la cual se hace complicado la recuperación final [40]. En la Figura 2.6, muestra el Diagrama de flujo para el beneficio de polvos de tarjetas de circuitos impresos molidas.

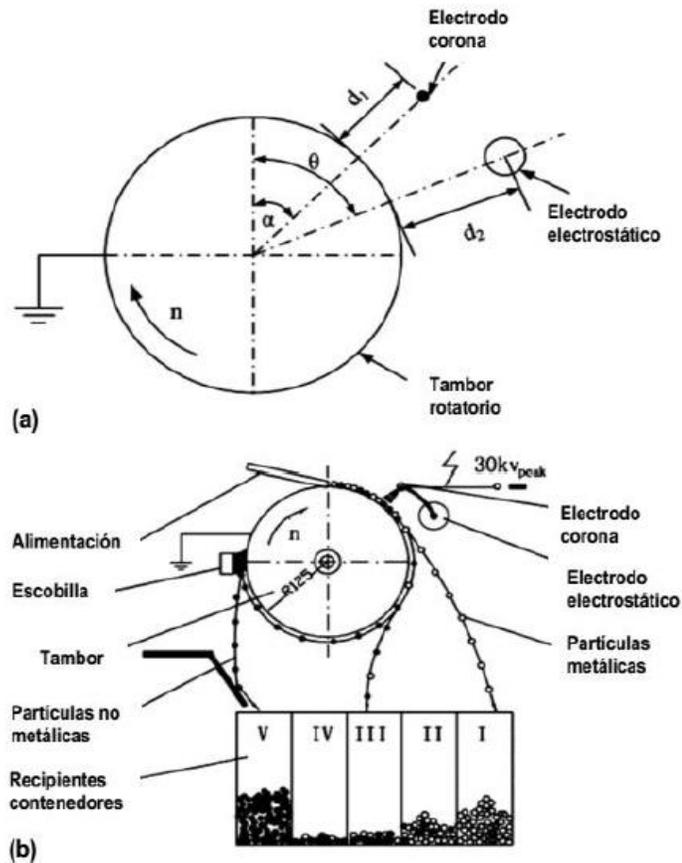


Figura 2.5: Parámetros de operación (a) del separador electrostático corona de laboratorio (b).

Lo más común es fundir los residuos de TCI para eliminar los plásticos y obtener un fundido de los diferentes metales.

Para evitar la formación de algunas sustancias peligrosas se han desarrollado estudios de tratamientos de residuos electrónicos mediante pirólisis con captura de gases. La pirólisis es uno de los mejores métodos para tratar mezclas los residuos y recuperar el material y el contenido de energía. En estos procesos se puede aprovechar los aceites de la pirólisis como combustibles o materias primas y los gases se pueden recoger y quemar para que el proceso de pirólisis sea autosostenible, evitando que haya emisiones contaminantes [33].

2.10.2 PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS Y PURIFICACIÓN

Los procesos hidrometalúrgicos son, quizá, los más estudiados para su aplicación en el tratamiento de residuos de TCI. Son una opción prometedora debido a los bajos costos de capital relativos, impactos ambientales reducidos, potencial para recuperaciones altas de metales, y son métodos adecuados para su aplicación a pequeña escala.

Como los metales presentes en los residuos de tarjetas de circuitos impresos se encuentran en forma elemental o en aleaciones, es necesario un proceso de lixiviación oxidante para la extracción efectiva de los metales de interés. Las principales propuestas consisten en lixivitaciones ácidas de metales base seguidas de la lixiviación de metales preciosos usando cianuro, tiosulfato, tiourea o haluros; donde el proceso de disolución en medio cloruro recibe el mayor interés y tiene el potencial para la extracción de metales base y preciosos en una única etapa de lixiviación.

La lixiviación química de metales implica distintos procesos usando ácido o ligandos acomplejantes. Las técnicas de lixiviación de metales preciosos más comunes consisten en procesos usando cianuro, haluros, tiourea y tiosulfato [41].

Investigadores desarrollaron un método para recuperar metales con alta pureza en varias etapas como se muestra en la Figura 2.7. Se realiza una lixiviación de plata, paladio y oro con agua regia a una razón fija de 1/20 (g/ml) entre metales y lixivante. Como la plata es relativamente estable en agua regia, se logra una extracción del 98% sin un tratamiento adicional. La cantidad precipitada de paladio es del 93%. En el caso del oro, se usó una extracción líquido-líquido con tolueno para una extracción selectiva [58]

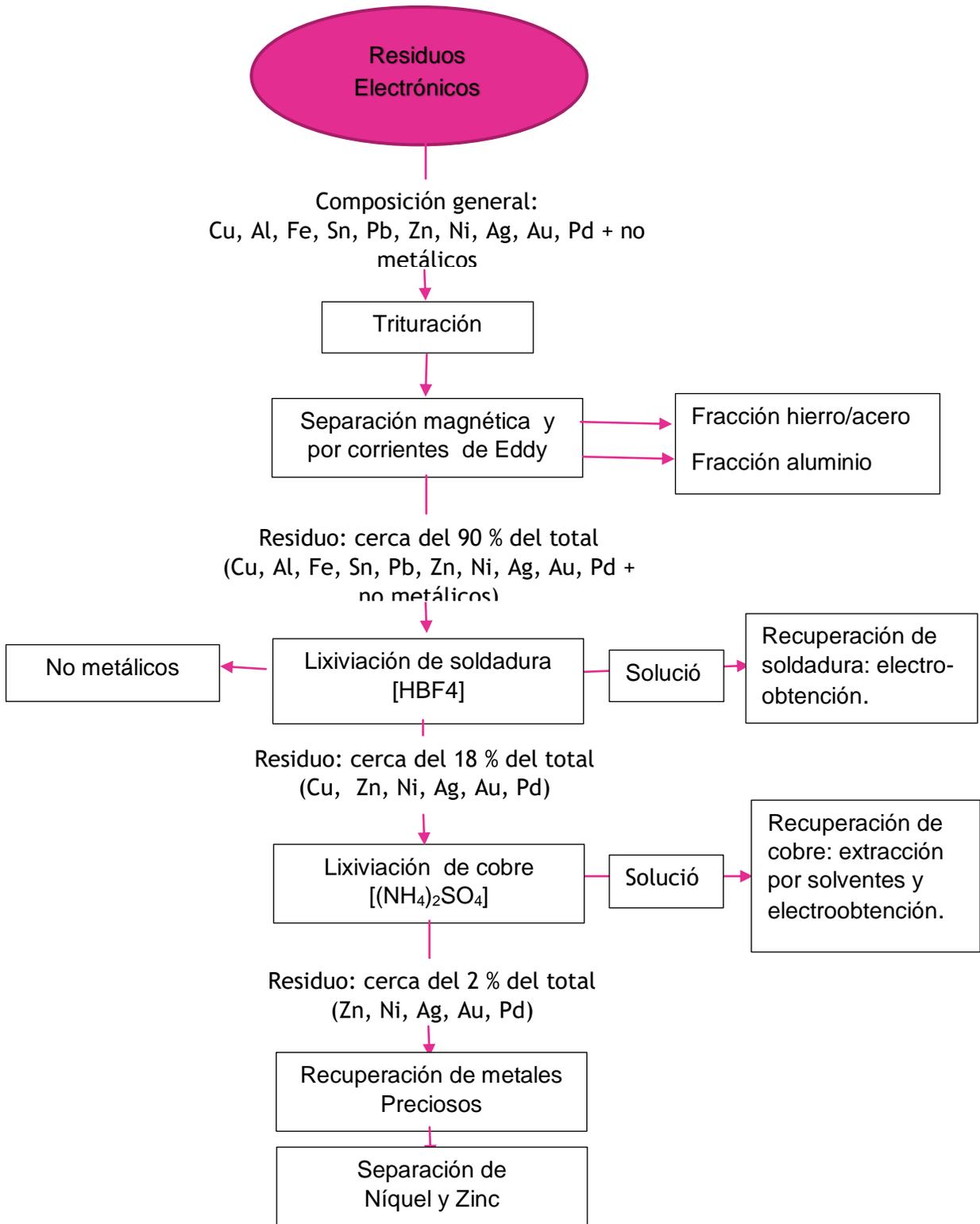


Figura 2.7: Proceso de reciclaje de metales preciosos a partir de TCE.

En cuanto a la lixiabilidad del Pb presente en los TCl, se ha realizado de diferentes formas en función de la naturaleza del sustrato en el que se encuentre, así como el estado final en el que se desee obtener el plomo.

En investigaciones recientes, se han utilizado ácidos orgánicos débiles como agentes lixiviantes en diferentes procesos. Estos ácidos se utilizan en presencia de reactivos y aditivos, para cambiar el potencial redox de las soluciones y contar así con un sistema reductor u oxidante, según sea el caso.

Uno de los ácidos más usados en el caso del plomo ha sido el EDTA (ácido etilendiamintetracético), debido a que se forman complejos altamente estables. Otro lixivante que puede ser utilizado es el ácido cítrico, formando complejos estables con el plomo, pero a diferencia del EDTA no tan fuertes, lo que permite una separación menos difícil [41].

CAPÍTULO 3

Desarrollo teórico y experimental.

Con el fin de alcanzar los objetivos del presente estudio, se propone una serie de procedimientos tanto teóricos como experimentales orientados en cuantificar la transformación de los materiales y de la energía, en la producción final de la sustancia de interés y en el aprovechamiento de la energía liberada.

Se inicia proponiendo los métodos que permiten conocer la producción teórica óptima de la cantidad de hidrógeno producido. Esto permite establecer un balance de materia en el proceso químico, el cual arroja datos de necesarios para conocer la eficiencia en la transformación de los reactivos participantes en el producto químico de interés energético.

Otro parámetro de interés es el comportamiento de la producción de hidrógeno, de acuerdo a la reacción de generación del mismo a lo largo del tiempo. Este parámetro se identifica en el presente trabajo a través de pruebas experimentales, bajo las condiciones de reacción propuestas.

La energía de reacción liberada al sistema de producción de hidrógeno es de importancia en el presente trabajo, debido al objetivo de captarla y transformarla en energía empleable. Se realizan los trabajos teóricos para conocer la cantidad de calor liberado por la reacción y establecer la eficiencia en captación de la misma, resultando en el cálculo de la eficiencia de conversión de energía que se realiza bajo las condiciones de reacción establecidas.

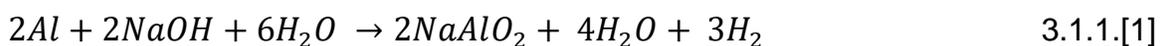
Lo anterior permite obtener el conocimiento para realizar la escalabilidad del sistema propuesto y obtener como producto final energía utilizable en aplicaciones adecuadas de interés.

3.1. Cálculos Teóricos.

En el presente apartado se encuentra la metodología seguida en los procesos predictivos y técnicas de laboratorio seguidas para lograr el conocimiento deseado y alcanzar los objetivos definidos.

3.1.1. Ecuación química de Interés para la producción de hidrógeno.

La reacción en la que se basa el presente trabajo es aquella que permite la producción de hidrógeno molecular a partir de la oxidación del aluminio en medio básico de hidróxido de sodio. Existen varias propuestas de reacción para la producción de hidrógeno bajo las condiciones mencionadas, sin embargo, la razón por la cual empleamos la ecuación química en 3.1.1.[1], es debido a que existen reportes bibliográficos que indican las propiedades de cada una de las especies químicas participantes.



Las condiciones de trabajo aplicables a cada una de las metodologías descritas en el Capítulo 3, así como sus resultados, son mencionados en el Capítulo 4.

3.1.2. Producción de hidrógeno.

Para realizar el cálculo del hidrógeno generado a partir de la reacción expresada en la ecuación química 3.1.1.[1], se considera como reactivo limitante al aluminio. En función

de la masa propuesta a reaccionar del reactivo limitante, se calcula la masa de hidrógeno generada mediante 3.1.2.[1].

$$m_{H_2} = \frac{m_{Alp} n_{H_2} PM_{H_2}}{n_{Al} PM_{Al}} \quad 3.1.2.[1]$$

En donde:

m_{H_2} Masa de hidrógeno producido por masa propuesta de aluminio (*g*).

m_{Alp} Masa propuesta del reactivo aluminio conforme a 3.1.1.[1] (*g*).

n_{Al} Coeficiente de reacción del aluminio metálico en 3.1.1.[1] (*mol*).

n_{H_2} Coeficiente de reacción del hidrógeno molecular en 3.1.1.[1] (*mol*).

PM_{Al} Masa molecular del aluminio (*g*).

PM_{H_2} Masa de hidrógeno generado en 3.1.1.[1] (*mol*).

El siguiente paso a desarrollar es el cálculo del volumen que ocupa el gas hidrógeno generado en las condiciones de trabajo propuestas.

Ya conocida la masa del hidrógeno producido por la masa de aluminio propuesto y con ayuda de la ecuación de los gases ideales 3.1.2.[2], se calcula el volumen de hidrógeno producido en las condiciones de trabajo propuestas. La presión atmosférica considerada es aquella en la que se encuentra el laboratorio de prueba en la que se realiza el proceso experimental.

A partir de 3.2.2.[2] se despeja el volumen (*V*) del gas, por lo que la ecuación que determina el volumen de gas hidrógeno producido es 3.1.2.[3].

$$P V = n R T \quad 3.1.2.[2]$$

$$V = \frac{n R T}{P} \quad 3.1.2.[3]$$

En donde:

- P Presión de 0.8 atm .
 V Volumen (L).
 n Moles de hidrógeno generado (mol).
 R Constante de los gases ideales ($0.08205746 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$).
 T Temperatura de 298 K .

3.1.3. Energía de reacción en la generación de hidrógeno.

En el presente estudio es indispensable conocer la energía liberada por la reacción, dado que se desea captarla para transformarla en energía eléctrica, basándose en el efecto Seebeck. Para el aprovechamiento de la energía, se considera aquella energía que se pierde por la presencia de los diferentes cuerpos que constituyen el sistema, como son el agua de la solución y el reactor de acero, los cuales inevitablemente absorben energía en función de su coeficiente calorífico y de su masa participante.

A continuación, se detallan los pasos realizados, junto con las bases teóricas empleadas, para realizar el cálculo teórico de la energía de reacción de 3.1.1.[1].

Primeramente, se considera la Ley de Hess (3.1.3.[1]) para conocer la energía de reacción.

$$Q_{rxn} = \sum n_p \Delta H_{fp}^0 - \sum n_r \Delta H_{fr}^0 \quad 3.1.3.[1]$$

En donde:

- Q_{rxn} Energía liberada de reacción por mol de aluminio ($J g^{-1} K^{-1}$).
 ΔH_f^0 Energía de formación ($kJ mol^{-1}$).

n Coeficiente de cada componente químico (*mol*).

p, r Reactivos, productos.

Con el fin de conocer la energía de 3.1.1.[1], se emplean la energía de formación para cada una de las especies químicas participantes, según la Tabla 3.1.3.[1].

Tabla 3.1.3.[1]. Energía de formación y coeficientes estequiométricos de cada especie química participante en la reacción de interés.

Especie química participante en la reacción	Energía de formación, ΔH_f° (kJ mol^{-1})	Coefficiente estequiométrico, n . (<i>mol</i>)
Al	0	2
NaOH	- 416.88	2
H ₂ O(l)	- 285.8	6 _r , 4 _p
NaAlO ₂	- 1133.2	2
H ₂	0	3

Se sustituye cada valor en su respectiva posición en 3.1.3.[1], y se realizan las operaciones correspondientes.

Considérese que el valor del calor de reacción obtenido mediante 3.1.3.[1], corresponde energía que se libera de la reacción por cada mol del reactivo limitante empleado, es decir, el calor desprendido del sistema por cada 53.9631 g de aluminio.

Las condiciones de reacción variarán con respecto a la relación calculada anteriormente, dado que la cantidad de reactivo limitante, el aluminio, varía por razones metodológicas, por lo que se considera para cada peso particular la cantidad de aluminio empleado, según las necesidades de la presente investigación. Para conocer los nuevos valores con respecto a las diferentes cantidades de aluminio propuestas, se considera la expresión matemática 3.1.3.[2].

$$\Delta Q_{r-AlP} = \frac{\left\{ \frac{PM_{Al}}{m_{AlP}} Q_{rxn} \right\}}{n} \quad 3.1.3.[2]$$

En donde:

ΔQ_{r-AlP}	Energía de reacción por peso de aluminio ($J g^{-1} K^{-1} mol^{-1}$).
PM_{Al}	Masa molecular de una mol de aluminio (g).
m_{AlP}	Masa del aluminio propuesto (g).
Q_{rxn}	Energía liberada en la reacción por mol de aluminio ($J g^{-1} K^{-1}$).
n	Moles de aluminio participantes de la reacción (mol).

3.1.4. Temperatura alcanzada por la reacción de producción de hidrógeno.

A continuación, se expone la base de cálculo teórico para conocer la temperatura de reacción alcanzada con las diferentes cantidades de aluminio propuesto en todo el sistema de producción de hidrógeno (SPH). Para obtener éste nuevo parámetro, se consideran únicamente las condiciones iniciales del sistema. Con el fin de encontrar la expresión pertinente, se considera la Ley de Hess 3.1.3.[1], obteniéndose y empleando la expresión 3.1.4.[1]. Para la aplicación de 3.1.4.[1] se consideran ahora los materiales que se encuentran en contacto con la solución en donde se efectúa la reacción, así como la solución misma:

- Solución de reacción.
- El reactor de acero.
- El nitrógeno con el que se purga el aire presente dentro del reactor.
- El agua en la que compone la solución donde se lleva a cabo la reacción.

$$T = \frac{-\Delta Q_{r-AlP} + \left\{ (M_{Acero} C_{pAcero} + M_{H_2O} C_{pH_2O} + M_{N_2} C_{pN_2}) \right\}}{M_{Acero} C_{pAcero} + M_{H_2O} C_{pH_2O} + M_{N_2} C_{pN_2}} \quad 3.1.4.[1]$$

En donde:

- T Temperatura del sistema de reacción ($^{\circ}C$).
- ΔQ_{r-AlP} Energía de reacción por masa de aluminio ($J g^{-1} K^{-1} mol^{-1}$).
- M Masa del cuerpo referido (g).
- C_p Capacidad calorífica del material referido ($J g^{-1} K^{-1}$).

El signo negativo que antecede a ΔQ_{r-AlP} , se coloca con el fin de trabajar con unidades positivas y tener así una congruencia con la temperatura obtenida, de lo contrario, se obtendrían temperaturas incongruentes negativas. Para la búsqueda de las diferentes temperaturas resultado del proceso experimental y empleando 3.1.3.[2], se consideran como condiciones iniciales las reflejadas en la Tabla 3.1.4.[1].

Tabla 3.1.4.[1]. Condiciones iniciales experimentales para conocer la temperatura final del sistema.

Substancias presentes	C_p ($J g^{-1} K^{-1}$)	Masa (g)
N_2	1.04	2.29
Acero	0.5	5460
$H_2O_{(sol)}$	4.1813	100

Podemos conocer la temperatura que alcanzan las paredes del reactor en nuestras condiciones de trabajo. A partir de los datos que se obtienen de las metodologías anteriores del presente apartado, se conoce la temperatura que se alcanza en las paredes del reactor. Este dato, al que nos avocamos, es importante para conocer una condición más de trabajo que nos permite lograr la captación de la energía de reacción y su subsecuente transformación en energía eléctrica.

Para lo anterior, empleamos los datos de capacidades caloríficas presentes en la Tabla 3.1.4.[2] junto con las masas involucradas de cada uno de los materiales y especies químicas participantes.

Tabla 3.1.4.[2]. Propiedades de los materiales y especies químicas participantes en el sistema

Id.	Especie química/ Material del sistema		Capacidad calorífica, C_p (J/g K)	Masa Inicial (g)	Energía de formación, ΔH_f^0 (kJ/mol)
1	Reactivos	Al	0.8970	10	0
2		NaOH _(s)	1.4800	17.79	-416.88
3		H ₂ O _{(l)reactivo}	4.1813	10.02	-285.8
4	Productos	NaAlO ₂	0.8979	30.38	-1,133.2
5		H ₂ O _(l)	4.1813	6.68	-285.8
6		H ₂	14.3040	0.56	0
7	Materiales	N ₂	1.04	2.29	-
8		Acero	0.5	5,460	-
9		H ₂ O _(sol)	4.1813	100	-

Para lo anterior se emplea la expresión matemática de la capacidad calorífica 3.1.4.[2], la cual se sustituye en 3.1.4.[3] en apego a las condiciones iniciales y finales, dando como resultado la expresión 3.1.4.[4], como se muestra a continuación.

$$Q = C_p m \Delta T \quad 3.1.4.[2]$$

$$\Delta Q = Q_f - Q_i \quad 3.1.4.[3]$$

$$\Delta Q = m_f C_{P_f} T_f - m_i C_{P_i} T_i \quad 3.1.4.[4]$$

Los sufijos i y f corresponden a las condiciones de reacción iniciales y finales, respectivamente. Despejando la temperatura de interés que es la temperatura final T_f , se obtiene la expresión 3.1.4.[5].

$$T_f = \frac{\Delta Q + \sum_1^i m_i C_{P_i} T_i}{\sum_1^f m_f C_{P_f}} \quad 3.1.4.[5]$$

En donde T_f es la temperatura final en grados centígrados o Kelvin, dependiendo del valor que se emplee en T_i que alcanzan las paredes del reactor al llevarse por completo la reacción 3.1.1.[1].

3.1.5. Presión del gas generado dentro del reactor.

Se han realizado los cálculos de los diferentes parámetros que se presentan al llevar a cabo la reacción 3.1.1.[1] en condiciones iniciales a una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$ (298 K) y 0.8 atm de presión. Se realiza el cálculo de la presión generada dentro del reactor que forma parte del SGH en donde se lleva a cabo la reacción.

Se debe considerar que si bien el reactor tiene 2.1 L de capacidad, para la contención del gas generado solo se ocupan 2 L , debido a que los 0.1 L restantes se encuentran ocupados por la solución de reacción.

A partir de 3.1.6.[1] y en las condiciones mencionadas, se calcula la presión generada dentro del reactor al reaccionar completamente los 10 g de aluminio.

$$PR_{H_2} = \frac{\frac{m_{AlP} m_{H_2R}}{m_{AlR}}}{PM_{H_2} Atm} \frac{R T}{V} \quad 3.1.6.[1]$$

En donde:

PR_{H_2}	Presión del H_2 dentro del reactor (<i>atm</i>).
m_{Alp}	Masa de aluminio propuesto en 3.1.1.[1] (<i>g</i>).
m_{H_2R}	Masa estequiométrica del reactivo hidrógeno en 3.1.1.[1] (<i>g</i>).
m_{AlR}	Masa estequiométrica del reactivo aluminio en 3.1.1.[1] (<i>g</i>).
PM_{H_2Atm}	Masa atómica de una molécula de hidrógeno (<i>g</i>).
R	Constante de los gases ideales ($0.08205746 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$).
T	Temperatura inicial 298 K .
V	Volumen del reactor que contiene el gas H_2 generado (2 L).

El resultado obtenido mediante 3.1.6.[1] se refiere a la presión que se genera dentro de reacción bajo las condiciones de reacción establecidas.

3.2. Pre-tratamiento del Aluminio.

El aluminio que empleamos es obtenido de latas de bebidas. Debido a la toxicidad del aluminio y a la probabilidad de que se agregue a la bebida que contiene el recipiente, el recipiente se cubre con una capa de resina epóxica, la cual sirve como aislante de protección en ambas direcciones. Igualmente, el aluminio de este tipo de recipiente está cubierto por pinturas que sirve tanto al fabricante como al consumidor para la identificación del producto. Estos dos materiales de recubrimiento, impiden el adecuado contacto entre la solución de hidróxido de sodio el aluminio en la generación de hidrógeno, provocando un retraso en la reacción y un mayor consumo del hidróxido de sodio. Es por esta razón que se requiere retirar estas capas de recubrimiento, para lo cual se sigue la presente metodología.

I. Material y reactivos.

- Tijeras para metal.
- Ácido sulfúrico al 98 % de pureza.

- Agua corriente.
- Agua destilada.
- Vaso de precipitados de *250 mL*.
- Agitador de vidrio.

II. Procedimiento.

- Se enjuaga con agua corriente el interior y exterior de la lata, permitiendo que se escurra el agua y se seque la lata.
- Con tijeras para metal se cortan la tapa inferior y superior de la lata, quedando solo el cuerpo del cilindro.
- Se corta el cuerpo del cilindro en cuadros pequeños de aproximadamente *0.25 cm²*.
- En un vaso de precipitados se coloca el metal y se añade H_2SO_4 .
- Se permite el contacto por *40 minutos*.
- Agitar intermitentemente.
- Se separa el ácido por decantación y se lava el metal con agua corriente.
- Se permite el secado del aluminio antes de usarse.

3.3. Producción de hidrógeno en matraz y su cuantificación.

Con el fin de llevar a cabo el balance de masa, se desarrolla el presente procedimiento para producir hidrógeno y cuantificarlo. De esta forma se conoce la eficiencia de reacción en las condiciones particulares de reacción propuestas en este trabajo de investigación.

I. Material y reactivos.

- Aluminio de latas de bebidas pretratado de *0.25 cm²*.
- Hidróxido de sodio al *98 %* de pureza.
- Agua destilada.
- Agua corriente.

- Algodón.
- 1 matraz Kitasato de *250 mL*.
- Probetas de *1000 mL*.
- Tapón de hule No. 6.
- 2 termómetros de bulbo de mercurio de *0 °C* a *100 °C*.
- Mangueras de hule de *0.5 cm* de diámetro interno.
- Conectores de manguera.
- Recipiente de agua de *4 L* de boca ancha.

II. Procedimiento.

- i. Se coloca Al tratado en el matraz Kitasato.
- ii. Se adiciona la solución de NaOH estequiométrica requerida con un *20 %* de exceso del reactivo.
- iii. Inmediatamente se coloca el tapón con los termómetros previamente montado. El bulbo de uno de los termómetros se coloca a la altura de la salida del matraz, en tanto que el segundo se coloca con el bulbo sumergido en la solución.
- iv. El gas generado es conducido a la probeta invertida y completamente llena de agua.
- v. Se permite la reacción hasta su término total.
- vi. Iniciada la reacción, el H₂ se recolecta por desplazamiento de agua en probetas de *1000 mL* graduadas cada *10 mL*.
- vii. Cada que el aforo de agua desplazada llega a la marca siguiente *de 10 mL*, se toma lectura del tiempo empleado.
- viii. En este mismo momento, se toma la lectura de la temperatura del gas.
- ix. Cuando el H₂ haya ocupado el total de la escala de la probeta colectora, la manguera de alimentación que lo conduce debe ser cambiada rápidamente a la siguiente probeta invertida y llena de agua, interrumpiendo momentáneamente el flujo del gas en tanto que se realiza el traslado.

Los resultados obtenidos de la presente metodología son representaciones gráficas del comportamiento de la producción de hidrógeno en el tiempo y del perfil de temperaturas para cada una de las condiciones experimentales reflejadas en la Tabla 4.1.1.[1].

3.4. Análisis de la mejor propuesta técnica para la separación del NaOH de la corriente de gas generada a partir de 3.1.1.[1].

A lo largo del presente desarrollo experimental, se establece que la corriente de gas generado por 3.1.1.[1] está compuesta por hidrógeno, vapor de agua e hidróxido de sodio disuelto en éste último. Como ya se comenta, la presencia de hidróxido de sodio en la corriente de gas degrada la calidad de la FEMFC, la cual es de carácter ácido. Es así que se desarrolla el presente apartado para encontrar la mejor técnica de separación de ésta base de la corriente de gas. Se formula la realización del presente apartado, para encontrar una técnica que permita la disminución o eliminación del hidróxido de sodio de la corriente de gas hidrógeno.

Se realiza una revisión bibliográfica en busca de las técnicas mencionadas.

Una vez identificadas las técnicas de interés, se someten a la evaluación de criterios de aceptación los cuales se mencionan en la Tabla 3.4.[1].

Tabla 3.4.[1]. Criterios de evaluación.

Costo.	Representa el costo de los materiales, equipo y su manejo.
Energía.	Se considera la energía total empleada en la preparación de los materiales y en el funcionamiento de la técnica.
Eficiencia.	Porcentaje de contaminante retirado.
Portabilidad.	Capacidad de llevar el sistema junto con la planta de producción de hidrógeno.
Tecnología.	Sofisticación de la tecnología requerida.
Seguridad.	Riesgo asociado a la aplicación de la técnica.
Ambiente.	Posible daño al ambiente por la aplicación de la técnica y los residuos generados.

Regeneración. Grado de retorno de los componentes a su estado inicial de funcionamiento.

Con ayuda de los criterios de evaluación se realiza la evaluación de las técnicas resultado de la revisión bibliográfica. La evaluación se apoya en la ponderación que se le da a cada criterio de evaluación presentes en la Tabla 3.4.[2]. Este paso permite tener un número como resultado de la evaluación de los criterios, el cual es evaluado en base a la Tabla 3.4.[3] que contiene el rango de la puntuación de aceptación y rechazo de los criterios en su conjunto.

Tabla 3.4.[2]. Ponderación de los criterios de evaluación.

Ponderación del criterio de evaluación.	Calif.
Totalmente adecuado al concepto.	4
Adecuado al concepto.	3
Inadecuado al concepto.	2
Totalmente inadecuado al concepto.	1

Tabla 3.4.[3]. Rango de evaluación de criterio.

Evaluación	Puntuación.
Totalmente aceptable	32 a 28
Adecuado.	27 a 22
Aceptable con medidas de control.	21 a 13
No aceptable.	12 a 8

Para que el criterio sea evaluado, debe emplearse la Tabla 3.4.[4], en donde deben ir acomodados los criterios según se indica en el formato de la misma tabla.

Tabla 3.4.4. Evaluación de criterios.

Id.	Técnica de separación de NaOH	Calificación de criterios de evaluación.							Evaluación	
		Costo	Energía	Eficiencia	Probabilidad	Tecnología	Seguridad	Ambiente		Regeneración
n	Criterio a evaluar.									

En el apartado de “Criterios a evaluar”, se colocan cada uno de los criterios de separación encontrados. En el apartado que se encuentra por debajo de cada calilla que va desde “Costo” hasta “Evaluación”, se colocan los números que indican la calificación otorgada a cada uno de los criterios en base a la Tabla 3.4.[2]. En la casilla de “Evaluación” se coloca la sumatoria de cada una de las ponderaciones dada para cada criterio, seguidamente se establece el grado de aceptación de por la evaluación obtenida en cada criterio.

En apego a los resultados que se obtienen, se escogen las dos mejores técnicas, establecido por los puntajes más altos obtenidos como resultado de la presente evaluación. Las dos mejores técnicas encontradas se reproducen a nivel laboratorio y se evalúa su conveniencia para ser aplicadas en el trabajo de investigación. La mejor técnica encontrada se emplea para eliminar el carácter básico de la mezcla de gases resultado de la generación de hidrógeno a partir de 3.1.1.[1].

3.5. Separación del hidróxido de sodio presente en la corriente de gas a partir de 3.1.1.[1], mediante columna de adsorción.

Durante la generación de gas hidrógeno, se descubrió que la corriente contiene un agente básico, dado que diferentes pruebas de cambio de *pH* así lo determinaron. Dada la naturaleza de la reacción 3.1.1.[1] y los factores externos, se considera que el incremento de *pH* de la corriente de gas, es dado por la presencia de NaOH disuelto en el agua que se evapora en cada punto de reacción del NaOH en la superficie del aluminio.

La presente técnica se centra en la eliminación de NaOH que se encuentra disuelto en el vapor de agua que acompaña al gas generado. Dependiendo de los resultados experimentales de las técnicas seleccionadas, se toma la decisión de integrar la PEMFC al Sistema de Producción de Hidrógeno, objetivo del presente trabajo.

3.5.1. Agua como agente adsorbente de hidróxido de sodio.

Una opción para la separación del hidróxido de sodio presente en la corriente de gas de hidrógeno, es su adsorción en columnas de agua químicamente pura. Esto se realiza haciendo pasar la mezcla de gases producida a través de agua conforme al procedimiento abajo descrito. La columna de agua contiene únicamente $H_2O \cdot QP$ o puede estar acompañada de algún agente inerte que permita alguna acción mecánica que favorezca la adsorción.

3.5.1.1. Agua en columna como adsorbente de hidróxido de sodio.

I. Material, equipo y reactivos.

- Aluminio de latas de bebidas de 0.25 cm^2 pretratado.
- Hidróxido de sodio al 98 % de pureza.
- Mezcla de gases de la generación de H_2 a partir de 3.1.1.[1].
- Agua químicamente pura ($H_2O \cdot QP$).
- 1 matraz Kitasato de 250 mL.
- Tapón de hule No. 6.
- 2 termómetros de bulbo de mercurio, graduado de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 3 probetas de vidrio de 100 mL.
- Potenciómetro.
- 3 difusores de gas.
- Mangueras de hule de 0.5 cm de diámetro interno.
- Conectores de manguera.

II. Procedimiento.

- i. Se emplea 1 g de Al en hojuelas pretratado, se hace reaccionar con 100 mL al 120 % de la cantidad estequiométrica necesaria de NaOH, dentro del matraz Kitasato.
- ii. Se mide el *pH* del H₂O·QP a emplearse dentro de la probeta como agente adsorbente (*pH* inicial). Se registra la temperatura de la muestra.
- iii. Se permite la reacción durante 60 min.
- iv. El gas generado se conduce a través del sistema de mangueras hasta el fondo de la probeta 1 llena con 100 mL de H₂O·QP. El extremo de la manguera tiene colocado un difusor para gases.
- v. Se coloca un arreglo en serie de probetas cada una con 100 mL de H₂O·QP y su respectivo difuso de gas.
- vi. Una vez la mezcla de gases pasa a lo largo de la columna 1, se dirige a la columna 2 y 3.
- vii. Se permite que todo el gas producido pase a través de las columna de agua para la adsorción del NaOH.
- viii. Inmediatamente al término de los 60 min de reacción, se mide el *pH* de la solución de cada bureta (*pH* final). Se registra la temperatura de la muestra,

3.5.1.2. Columna de agua con agente mecánico de adsorción.

Una metodología a emplear para mejorar la eficiencia de la adsorción del hidróxido de sodio en el agua, es la introducción de un agente inerte a los compuestos que conforman la corriente de gas para mejorar la eficiencia de la adsorción, aumentando el área de exposición de la burbuja de gas en la columna con H₂O·QP,

I. Material, equipo y reactivos.

- Aluminio de latas de bebidas de 0.25 cm² pretratado.
- Hidróxido de sodio al 98 % de pureza.

- Mezcla de gases de la generación de H₂ por (1).
- Agua químicamente pura (H₂O·QP).
- 1 matraz Kitasato de 250 mL.
- Tapón de hule No. 6.
- 2 termómetros de bulbo de mercurio graduados de 0 °C a 100 °C.
- 3 columnas plásticas de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro superior.
- Potenciómetro.
- 3 aspersores de gas.
- Mangueras de hule de 0.5 cm de diámetro interno.
- Conectores de manguera.
- 250 g de polipropileno cilíndrico de 1 cm de altura y 4 mm de diámetro interior.

II. Procedimiento.

- i. En matraz de vidrio se permite reaccionar 100 mL de solución de hidróxido de sodio con 20 % de exceso del requerimiento estequiométrico para la oxidación de 1 g de aluminio.
- ii. En cada extremo del conducto de la mezcla de gases se le coloca un difusor de aire.
- iii. Se toma la lectura de *pH* del agua dentro de las columnas de adsorción al inicio y al final de la reacción.
- iv. Cada extremo de los conductos de la mezcla de gases se coloca en el fondo de cada una de las 3 columnas con agua empacadas totalmente con cilindros de polipropileno.
- v. Se permite la reacción por 60 min.
- vi. Se analizan las lecturas de *pH* registradas.

3.5.2. Silicato de alúmina como adsorbente de humedad.

La presente prueba se realiza en dos formas, la primera sin emplear la columna de adsorción de silicato de alúmina y la segunda empleando la columna de adsorción de silicato de alúmina.

Para emplear el silicato de alúmina es necesario activarlo, para lo cual se presenta a continuación el procedimiento empleado.

3.5.2.1. Activación del silicato de alúmina.

I. Material, equipo y reactivos.

- Silicato de alúmina.
- 5 vasos de precipitados de *100 mL*.
- Mufla.

II. Procedimiento.

Se colocan *180 g* de silicato de alúmina dentro de los vasos de precipitados al *90 %* de su capacidad. Los vasos con silicato de alúmina son introducidos a la mufla previamente calentada a *450 °C* y se permite su estancia durante *3 horas*. Transcurrido éste tiempo se retira el silicato de alúmina del horno y por la parte superior se vierte dentro de la columna de adsorción hasta la altura deseada. Se colocan los tapones herméticos y se inicia la reacción.

3.5.2.2. Procedimiento para la separación de humedad mediante silicato de alúmina en columna de adsorción

El presente procedimiento se basa en la adsorción de la humedad en la que se encuentra disuelto el hidróxido de aluminio dentro de la corriente del gas generado a partir de 3.1.1.[1].

I. Material y reactivos.

- Aluminio de latas de bebidas de 0.25 cm^2 pretratado.
- Hidróxido de sodio al 98 % de pureza.
- Agua destilada.
- 1 matraz Kitasato de 250 mL .
- Tapón de hule No. 6.
- 2 termómetros de bulbo de mercurio graduados de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Corriente de gas generado en la reacción 3.1.1.[1].
- Silicato de alúmina activada.
- Mangueras de hule de 0.5 cm de diámetro interno.
- Conectores de manguera.
- Tubo de PVC de 1 m de longitud y diámetro interno de $\frac{3}{4} \text{ pl.}$
- Tapones herméticos superior e inferior del tubo de PVC.
- Aspersor de gas.
- Probeta de vidrio de 100 mL .

II. Procedimiento.

- i. Dentro del matraz Kitasato se permite la reacción 3.1.1.[1].
- ii. Se conduce por mangueras de hule el gas generado hacia la parte inferior de la columna de adsorción.
- iii. El gas se hace pasar a través de la columna de adsorción vertical previamente empacada con 175 g de silicato de alúmina. Para contener el silicato de alúmina, la parte baja del interior de la columna de adsorción es empaquetada con 2 cm de altura con algodón para evitar el retroceso del silicato de alúmina a través del conducto de entrada del gas.

- iv. Después de que el gas atraviesa la columna de adsorción, éste es conducido a una columna de adsorción con agua. Esta columna se emplea como un control para identificar la presencia de la base, a través de las lecturas inicial y final de *pH*.
- v. En el extremo de la manguera que conduce la mezcla de gases en cada etapa del recorrido, se coloca un difusor de aire, con el fin de hacer el tamaño de burbuja lo más pequeño posible. El difusor conectado a la manguera es colocado hasta el fondo de la probeta que contiene *100 mL* de agua destilada.
- vi. Se permite la reacción por 60 min.
- vii. Momentos antes de iniciar la reacción y al término de la misma, con la ayuda de un potenciómetro, se toman las lecturas de *pH* del agua contenido en la columna de adsorción de control.

3.6. Efecto Seebeck.

Uno de los objetivos que se presenta en este trabajo es la transformación de energía calorífica a energía eléctrica. Lo anterior se logra aprovechando que la reacción de 3.1.1.[1] es una reacción exotérmica. Las temperaturas teóricas alcanzadas en el sistema de producción de hidrógeno se reflejan en el apartado 3.3. del presente trabajo. Lo que se hace es transformar la energía gracias al efecto Seebeck, que establece una generación de potencial eléctrico a través de la diferencia de temperatura en un circuito eléctrico. El circuito eléctrico en mención es un módulo termoeléctrico (TEM), también nombrado placa Peltier, la cual ya fue descrita en la sección de Antecedentes.

Hay varios factores teórico-experimentales que deben ser de nuestra atención para lograr la mayor eficiencia posible en la conversión de energía, dado que existe una conservación de la energía, no es posible transferirla completamente para lograr una eficiencia del 100 %. Es por ello que nos damos a la tarea de controlar los factores que disminuyen la eficiencia con el fin de controlarlos y que nuestra transferencia de energía sea siempre la más eficiente posible.

3.6.1. Pruebas de Torque.

Uno de los factores que se presentan en la transferencia de energía calorífica por conducción es el contacto. Por ello es que se debe asegurar que la unión entre los cuerpos que participan en la conducción es el óptimo, tal que permita que la conducción sea lo más eficiente posible. El cuerpo emisor de la energía calorífica es el reactor, en tanto que el cuerpo receptor son los Módulos Termoeléctricos (TEM), específicamente placas Peltier, El contacto de éstos cuerpo debe ser el óptimo para obtener la mejor eficiencia en la transferencia de energía.

Los TEM se unen al cuerpo emisor a través de cuatro tornillos con sus respectivas rondanas y tuercas que ejercen en su conjunto la fuerza de contacto requerida. El contacto al que nos referimos en este apartado se lleva a cabo entre dos metales, por lo que se coloca una grasa térmica entre ellos que permite el llenado de las áreas fuera de contacto, asegurando así su participación en la transferencia del calor generado.

La presión de contacto que se ejerce es de importancia, dado que se consideran tanto la eficiencia de la transferencia de calor entre las superficies participantes, como el resguardo de la integridad de los materiales.

La fuerza de contacto más adecuada se determina en conjunto con el mayor rendimiento eléctrico obtenido a dicha presión, para lo cual se hacen las pruebas de potencia pertinentes a una sola temperatura para cada fuerza de presión propuesta.

I. Material y equipo.

- 2 módulos TEM modelo TEC1-127-09 de 40 mm x 40 mm x 4 mm.
- 2 módulos TEM modelo TEC1-127-15 de 40 mm x 40 mm x 4 mm.
- 2 controladores de temperatura (fría y caliente).
- 2 termopares tipo K.

- 2 placas de aluminio soporte de los termopares.
- 2 intercambiadores de calor.
- Ensamble de prueba.
- Potenciostato/galvanostato Bio-Logic VMP3 con booster VMP3B-20 20A/20V.
- 2 multímetros con lector de temperatura.
- Torquímetro.
- Bomba peristáltica.
- Mangueras.
- Conectores de mangueras.

II. Procedimiento.

- i. Se ensambla el dispositivo de prueba.
- ii. Se establecen las temperaturas fría y caliente del dispositivo a 4 °C y a 65 °C, respectivamente.
- iii. Se fija la presión del dispositivo a 5 lb pulg² a través de sus tornillos de sujeción.
- iv. Se espera a la estabilización térmica del dispositivo considerando la lectura de los termopares.
- v. Se realiza una curva de polarización desde potencial a circuito abierto (OCP) hasta 0 V, a una velocidad de barrido de 0.5 V seg⁻¹.
- vi. Se calcula la potencia máxima del módulo.
- vii. Repetir los pasos del *iii* al *vi* aumentando la presión y a cada 5 lb pulg² hasta llegar a las establecidas para su evaluación.

Una vez encontrado el torque ejercido sobre cada uno de los cuatro tornillos de sujeción y en el que el TEM presenta una mayor eficiencia eléctrica, se procede a realizar el cálculo para conocer la presión a la que se encuentra todo el ensamble de prueba en su conjunto, presión a la que se debe reproducir la unión de contacto entre el TEM y la pared del reactor al momento de realizarse la reacción 3.1.1.[1].

3.6.2. Selección de las dos TEM de mejor rendimiento eléctrico.

Una vez establecido el torque más adecuado para aumentar la eficiencia de la transferencia de calor, se procede a seleccionar las dos TEM con mejor rendimiento eléctrico, lo cual se hace en seguimiento con el presente procedimiento.

I. Material y equipo.

- 2 módulos TEM modelo TEC1-127-09 de 40 mm x 40 mm x 4 mm.
- 2 módulos TEM modelo TEC1-127-15 de 40 mm x 40 mm x 4 mm.
- 2 controladores de temperatura (fría y caliente).
- 2 termopares tipo K.
- 2 placas de aluminio soporte de los termopares.
- 2 intercambiadores de calor.
- Ensamble de prueba.
- Potenciostaro/galvanostato Bio-Logic VMP3 con booster VMP3B-20 20A/20V.
- 2 multímetros con lector de temperatura.
- Torquímetro.
- Bomba peristáltica.
- Mangueras.
- Conectores de mangueras.

II. Procedimiento.

- i. Se ensambla el dispositivo de prueba.
- ii. Se establecen las temperaturas fría y caliente del dispositivo a 4 °C y a 65 °C, respectivamente.
- iii. Se fija la presión del dispositivo a la fuerza de presión en libras por pulgada cuadrada a la cual el rendimiento eléctrico haya sido mayor según el procedimiento 3.6.1.

- iv. Se espera a la estabilización térmica del dispositivo considerando la lectura de los termopares.
- v. Se realiza una curva de polarización desde potencial a circuito abierto (OCP) hasta 0 V , a una velocidad de barrido de 0.5 V .
- vi. Se calcula la potencia máxima del módulo.
- vii. Se repite el procedimiento con cada uno de los TEM.
- viii. Se calcula el potencial máximo de cada TEM y se escoge a aquellos dos con mejor rendimiento eléctrico.

3.6.3. Caracterización de las TEM con mejor rendimiento eléctrico.

Como resultado del procedimiento en 3.6.2. se obtienen los TEM (Módulos Termoeléctricos - Placas Peltier) con mejor rendimiento eléctrico señaladas en el presente apartado por 4.6.2. A éstos TEM se realiza la caracterización eléctrica a distintas variaciones de temperatura bajo el presente procedimiento.

I. Material y equipo.

- 2 módulos TEM modelo TEC1-127-09 de $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 4\text{ mm}$.
- 2 controladores de temperatura (fría y caliente).
- 2 termopares tipo K.
- 2 placas de aluminio soporte de los termopares.
- 2 intercambiadores de calor.
- Ensamble de prueba.
- Potenciostaro/galvanostato Bio-Logic VMP3 con booster VMP3B-20 20A/20V.
- 2 multímetros con lector de temperatura.
- Torquímetro.
- Bomba peristáltica.
- Mangueras.
- Conectores de mangueras.

II. Procedimiento.

- i. Se ensambla el dispositivo de prueba.
- ii. Se fija la presión del dispositivo a la fuerza de presión en libras por pulgada cuadrada a la cual el rendimiento eléctrico haya sido mayor según el procedimiento 3.6.1.
- iii. Se establecen las temperaturas fría y caliente del dispositivo a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. La temperatura caliente se aumenta eventualmente según se indican las condiciones experimentales.
- iv. Se espera a la estabilización térmica del dispositivo considerando la lectura de los termopares.
- v. Se realiza una curva de polarización desde potencial a circuito abierto (OCP) hasta 0 V , a una velocidad de barrido de 0.5 V seg^{-1} .
- vi. Se calcula la potencia máxima del módulo.
- vii. Se aumenta la temperatura caliente y se repite el procedimiento con cada $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de diferencia hasta llegar a 65°C .
- viii. Se calcula el potencial máximo de cada variación de temperatura.
- ix. Se repite todo el procedimiento para cada uno de las dos TEM escogidas en el procedimiento 3.6.2.
- x. Para todas las pruebas realizadas se calcula el potencial máximo.
- xi. Se genera un gráfico de comportamiento para cada TEM a las diferentes temperaturas propuestas.

3.7. Prueba de hermeticidad del reactor.

La presente prueba tiene como fin asegurar que los diferentes componentes del sistema de producción de hidrógeno, contribuyen a mantener dentro del mismo el hidrógeno generado. De acuerdo al diseño del dispositivo, existen varios puntos de unión del equipamiento y de ensamble del equipo en donde se pueden presentar fugas del material

presurizado. Si bien las condiciones de trabajo son unas, la presión de prueba de calcula con un porcentaje en exceso de la presión de trabajo.

I. Material y equipo.

- Gas nitrógeno.
- Controladores de presión.
- Sistema de producción de hidrógeno.
- Torquímetro.
- Recipiente de 40 L de boca ancha.

II. Procedimiento teórico de la fuerza de contención.

Se instala el Sistema de Producción de Hidrógeno (SPH) junto con todos sus elementos de operación y control. Se asegura que los conectores se encuentran ajustados. Para el ajuste de los 12 pernos que unen a la tapa con el cuerpo del SPH están con la suficiente fuerza de sujeción o sellado que asegure la hermeticidad del reactor, se consideran varios aspectos, como es la presión positiva del gas producido y contenido, el área del sello y área de la brida. A través de los pernos se pretende contrarrestar la presión positiva ejercida por el gas. Las fuerzas ejercidas por el gas a contrarrestar son la fuerza radial, la fuerza de separación y la carga de bridas. ^{3.7.(1)}

La primera fuerza a considerar para el cálculo deseado, es la fuerza de separación, que tiende a separar las bridas desde el interior del reactor, por lo que se establece como presión positiva. Para el cálculo de la de la fuerza de separación (F_1), se emplea la expresión 3.7.[1].

$$F_1 = P_g (A_b + A_s m_s) \quad 3.7.[1]$$

En donde:

- F_1 Fuerza de separación
 P_g Presión del gas.
 A_b Área de la brida.
 A_s Área del sello.
 m_s Factor de empaque.

El factor de empaque es una constante proporcionada por el código ASME reflejado en la Tabla 3.7.[1].

Tabla 3.7. (1). Factores de empaque de diferentes materiales.

GASKET MATERIALS AND CONTACT FACINGS¹
Gasket Factors m for Operating Conditions and Minimum Design Seating Stress y

Gasket Material	Gasket Factor m	Min. Design Seating Stress y , psi (MPa)	Sketches	Facing Sketch and Column in Table 2-5.2
Self-energizing types (O rings, metallic, elastomer, other gasket types considered as self-sealing)	0	0 (0)
Elastomers without fabric or high percent of mineral fiber: Below 75A Shore Durometer 75A or higher Shore Durometer	0.50 1.00	0 (0) 200 (1.4)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
Mineral fiber with suitable binder for operating conditions: 3/8 in. (3.2 mm) thick 3/4 in. (1.6 mm) thick 3/2 in. (0.8 mm) thick	2.00 2.75 3.50	1,600 (11) 3,700 (26) 6,500 (45)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
Elastomers with cotton fabric insertion	1.25	400 (2.8)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
Elastomers with mineral fiber fabric insertion (with or without wire reinforcement):				
3-ply	2.25	2,200 (15)		
2-ply	2.50	2,900 (20)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
1-ply	2.75	3,700 (26)		
Vegetable fiber	1.75	1,100 (7.6)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
Spiral-wound metal, mineral fiber filled: Carbon Stainless, Monel, and nickel-base alloys	2.50 3.00	10,000 (69) 10,000 (69)		(1a),(1b); Column II
Corrugated metal, mineral fiber inserted, or corrugated metal, jacketed mineral fiber filled: Soft aluminum Soft copper or brass Iron or soft steel Monel or 4%–6% chrome Stainless steels and nickel-base alloys	2.50 2.75 3.00 3.25 3.50	2,900 (20) 3,700 (26) 4,500 (31) 5,500 (38) 6,500 (45)		(1a),(1b); Column II

La siguiente fuerza a considerar es la fuerza radial (F_2), que es aquella originada por la presión que ejerce la fuerza positiva sobre la junta. Para determinar F_2 se emplea la expresión 3.7.[2].

$$F_2 = P_g A_{bi} \quad 3.7.[2]$$

En donde:

F_2 Fuerza radial

P_g Presión del gas.

A_{bi} Área del borde interno del sello.

La consideración de todas las fuerzas actuantes en el sistema siempre son de importancia, sin embargo, en este caso no se considera la fuerza radial debido a que su valor es despreciable comparado con la fuerza de separación, para fines prácticos. En la expresión matemática 3.7.[3] se expresa la fuerza total requerida que permite el sellado del reactor para contener toda la fuerza de presión que se ejerce dentro de éste.

$$F_T = P_g (A_b + A_s m_s) \quad 3.7.[3]$$

Una vez encontrada la fuerza total es necesario conocer la fuerza que se requiere ejercer en cada perno que mantienen juntos al cuerpo del reactor con su tapa. Es entonces que se emplea la expresión 3.7.[4], en donde se relaciona el torque requerido por cada perno a emplear.

$$F_p = \frac{F_T}{N_p} \quad 3.7.[4]$$

En donde:

F_p Fuerza por perno.

F_T Presión del gas.

N_p Número de pernos a emplear.

La fuerza por perno resultante es la que se debe aplicar en cada uno de los pernos mediante la aplicación de un torque. Debido a este principio, se deben considerar otras características de este sistema en particular, como son el diámetro nominal del perno y su coeficiente de fricción. La fricción que genera el perno al ser ajustado depende si éste está lubricado o no, siendo sus valores respectivos de 0.15 y 0.20. Por lo anterior, es que se requiere emplear el coeficiente de fricción conforme a la expresión 3.7.[5].

$$T = K F_p D \quad 3.7.[5]$$

En donde:

F_p Fuerza por perno.

K Coeficiente de fricción.

D Diámetro nominal.

II. Procedimiento de laboratorio para hermeticidad.

Una vez conocido y con la ayuda de un torquímetro, se aplica el torque calculado según las condiciones de prueba, en cada uno de los pernos que sujetan al cuerpo del reactor con su tapa. Se llena el SPH con hidrógeno a una presión que excede en 30 % a la presión de trabajo. Una vez lleno el recipiente a la presión de interés se procede a ser sumergido el sistema completo en un recipiente de 40 L de capacidad para identificar alguna fuga del gas comprimido realizando una inspección visual.

Se considera que el sistema es hermético si bajo la inspección visual no se encuentran fugas de gas.

CAPÍTULO 4

Resultados y Discusión

4.1. Resultados teóricos.

4.1.1. Producción de hidrógeno.

A continuación se presentan los resultados teóricos emanados del procedimiento 3.1.2. Producción de hidrógeno. Sin embargo, debe considerarse que en el presente trabajo se establecen diferentes condiciones para la generación de hidrógeno en apego a la ecuación química 3.1.1.[1]. La consideración de la presión atmosférica se realiza estableciendo ésta a 0.8 atm debido a la altura a la que se encuentran los laboratorios de prueba empleados donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales.

En la Tabla 4.1.1.[1] se presentan las condiciones de trabajo propuestas y el resultado de los cálculos realizados en base a cada una de ellas.

Tabla 4.1.1.[1]. Resultados teóricos de la producción de hidrógeno a 0.8 atm y a partir de diferentes cantidades del reactivo limitante.

Id.	Aluminio Propuesto (g)	Hidrógeno generado		
		Peso (g)	Volumen (mL)	Moles
1.	0.5	0.03	0.85	0.03
2.	1.0	0.06	1.69	0.06
3.	1.5	0.08	2.55	0.08
4.	2.0	0.11	3.39	0.11
5.	2.5	0.14	4.25	0.14
6.	10.0	0.56	16.99	0.56

Los resultados identificados del 1 al 4 de la Tabla 4.1.1.[1] se intentan reproducir experimentalmente en apego al procedimiento 3.3. Producción de hidrógeno en matraz y su cuantificación. El resultado correspondiente a Id. 5 se considera debido a que en el Sistema de Producción de Hidrógeno se lleva a cabo la reacción con 10 g del reactivo limitante.

En la Figura 4.1.1.[1] se presenta gráficamente el comportamiento de la producción teórica de la producción de hidrógeno a partir de diferentes cantidades del reactivo limitante. Si generación con respecto a la cantidad de aluminio como reactivo en lineal, como lo indica su coeficiente de correlación lineal con valor de 1.

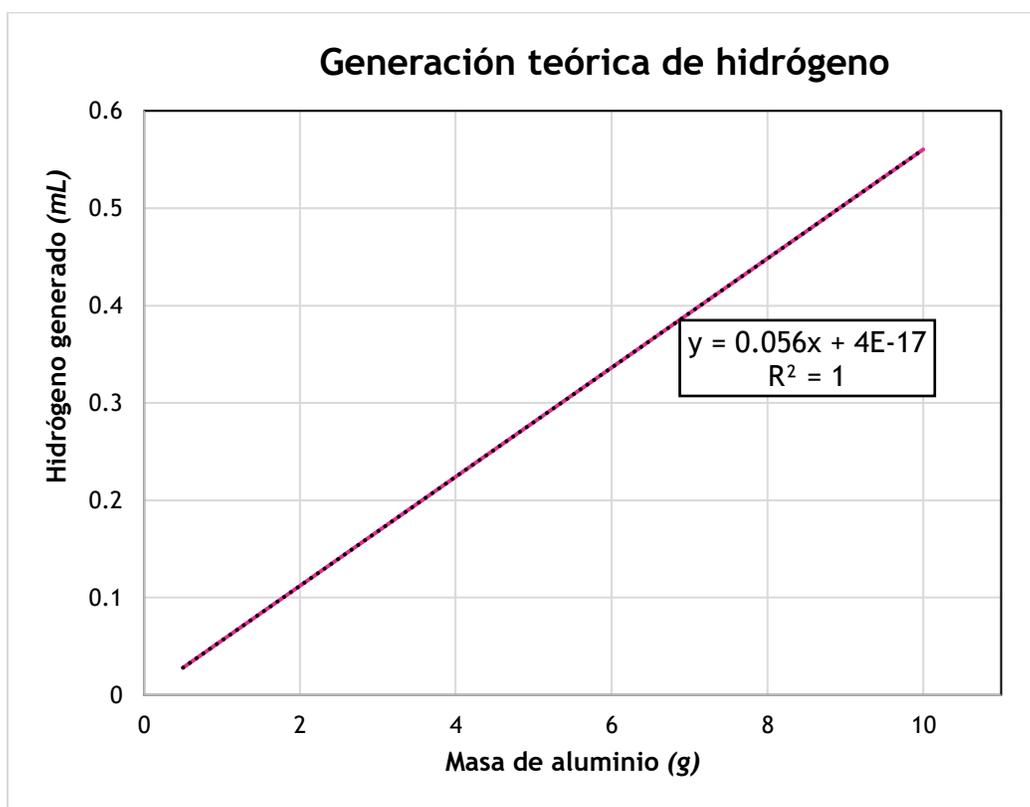


Figura 4.1.1.[1]. Generación de hidrógeno a partir de cantidades conocidas de aluminio.

4.1.2. Energía de reacción en la generación de hidrógeno.

En apego al procedimiento 3.1.3. se sustituye cada valor estequiométrico de 3.1.1.[1] junto con sus respectivas propiedades en 3.1.3.[1], se realizan las operaciones aritméticas correspondientes y se obtiene que el calor de reacción de es de **- 861.049 J mol⁻¹**. El signo negativo del resultado indica que es una reacción exotérmica. Cabe mencionar que en la bibliografía igualmente se encuentran resultados sobre la energía de reacción de 3.1.1.[1], que es de **- 861,040 J mol⁻¹**. Si comparamos los datos arrojados por la bibliografía con los resultados teóricos encontrados en la presente investigación, se puede observar que existe una diferencia porcentual del 1.6 %, por lo que nuestro resultado se establece como dentro de los parámetros de aceptación.

Debido que una de las condiciones de investigación del presente trabajo no es la generación de hidrógeno empleando las cantidades estequiométricas de 3.1.1.[1], sino condiciones particulares de reacción, es que los cálculos estarán siempre condicionados a los requerimientos de hidrógeno de la celda de combustión de intercambio catiónico (PEMFC) a emplear. Por lo anterior se controla la cantidad de nuestro reactivo limitante, el aluminio. Con el objetivo de que el sistema de producción de hidrógeno genere la cantidad suficiente de hidrógeno para la operación de la PEMFC, se emplean solamente **10 g** de aluminio.

Para conocer la energía liberada por la reacción 3.1.1.[1] adicionando únicamente **10 g** de aluminio, se emplea la expresión 3.1.3.[2] realizando el balance de masa correspondiente para considerar la cantidad de reactivos y productos correspondientes. Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, la energía de reacción es de **- 159,561 J mol⁻¹**. Se observa que el valor de la energía de reacción en ambos casos es negativo, lo que indica que la reacción es exotérmica.

4.1.3. Temperatura alcanzada por la reacción de producción de hidrógeno.

En el presente apartado se calcula de forma teórica la temperatura que alcanza el SPH, según las condiciones preestablecida: para ello se emplean *10 g* de aluminio como reactivo. Igualmente se consideran los valores expresados en la tabla 3.1.4.[2].

En apego al procedimiento 3.1.4. “Temperatura alcanzada por la reacción de producción de hidrógeno”, se calcula la temperatura teórica que se presenta en las paredes de reactor. Es así como se establece que la temperatura del sistema de producción de hidrógeno T_f es de **75.6 °C**.

4.1.4. Presión del gas generado dentro del reactor.

El gas generado por la reacción expresada en 3.1.1.[1] es contenido dentro del reactor. Las condiciones de reacción dentro del reactor son diferentes, dado que el volumen del gas generado siempre estará confinado dentro del reactor de *2.1 L* de capacidad, de los cuales solo *2 L* están disponibles para la contención de gas, dado que el *0.1 L* restantes es ocupado por la solución acuosa de reacción.

Las condiciones estequiométricas de reacción establecen que en presencia de *10 g* de aluminio y *14.82 g* de hidróxido de sodio en solución acuosa, se genera *0.56 moles* de hidrógeno. Si ésta cantidad de hidrógeno es contenida dentro de nuestro reactor de *2 L* efectivos de capacidad para la contención del gas. La presión generada dentro del reactor del sistema de producción de hidrógeno es de **6.80 atm**.

4.2. Producción de hidrógeno en matraz y su cuantificación.

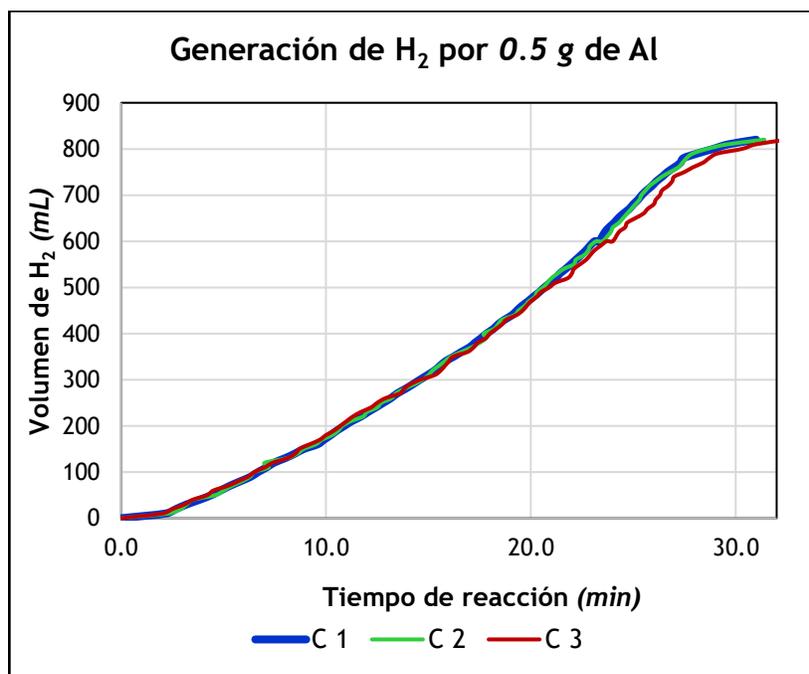
Se requiere conocer la tasa de generación de gas hidrógeno a partir de la reacción expresada en 3.1.1.[1] a partir de diferentes concentraciones del reactivo limitante (Al). Las pruebas se realizan con diferentes cantidades de aluminio, las cuales son de *0.5 g*,

1 g, 1.5 g, 2 g y 2.5 g. La concentración de NaOH en la solución empleada para cada concentración de aluminio es la requerida estequiométricamente más un 20 % de exceso, siempre llevados a 100 mL de agua.

Las lecturas tomadas en cada experimentación son de la producción de hidrógeno a lo largo del tiempo y de la temperatura alcanzada dentro de la solución.

A continuación aparecen las representaciones gráficas de la producción de hidrógeno y la de las temperaturas alcanzadas, por cada alícuota de aluminio establecida.

La generación de hidrógeno a partir de 0.5 g de aluminio pretratado y proveniente de latas de bebidas, se representa en la figura 4.2.[1]. Los gráficos corresponden a cada una de las tres corridas que se efectuaron bajo las mismas condiciones de trabajo. La desviación estándar que arroja su análisis estadístico se cita en el cuadro a la derecha del gráfico (Tabla 4.2.[1]), así como el porcentaje de error de entre las tres mediciones a tiempos determinados.



t (min)	D.E.	Error (%)
5	0.1	1
10	0.16	2
15	0.19	2
20	1.4	7
25	2.1	12
30	3	18

Figura 4.2.[1]. Representación de las corridas (C) en la producción de H₂ en matraz con 0.5 g de aluminio.

Tabla 4.2.[1]. Desviaciones estándar (D.E) y error porcentual (E%) en el tiempo (t), de las corridas de la F.4.2.[1].

En la Figura 4.2.[2] se muestra el comportamiento de la producción de hidrógeno con 0.5 g de aluminio junto con los datos de su regresión lineal y **coeficiente de correlación lineal de 0.9851**. Se observa que la producción de hidrógeno después de 31 minutos es de **820 mL**. Esto nos permite establecer que durante los primeros 30 minutos de reacción la producción de hidrógeno lo suficientemente constante como para asegurar una fuente constante de hidrógeno que permita la alimentación de algún dispositivo como puede ser una PEMFC sin necesidad de almacenar el hidrógeno en el SPH.

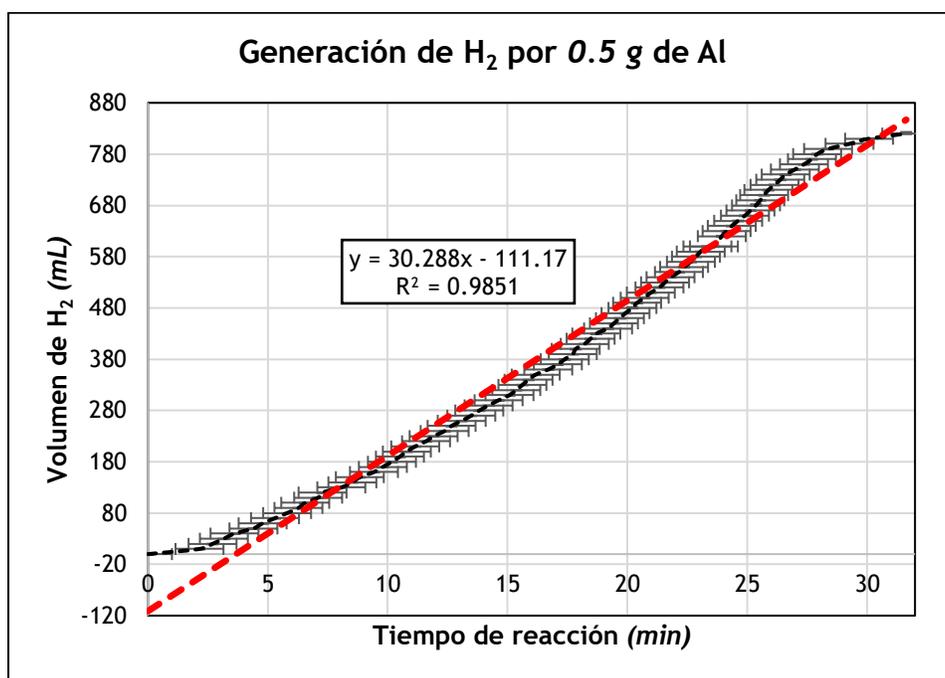


Figura 4.2.[2]. Producción de H₂ en matraz con 0.5 g de aluminio junto con la regresión lineal correspondiente.

El siguiente resultado en la Figura 4.2.[3] muestra el comportamiento de la temperatura registrada del gas como resultado de la reacción. Existen periodos de tiempo en los que la temperatura no se incrementa sino hasta el final de cada periodo, realizando un incremento 0.5 °C por vez. Durante la reacción se observan pequeñas burbujas de gas formándose y desprendiéndose de la superficie del aluminio, mostrando periodos de aumento y disminución en la producción de burbujas, lo que indica un aumento y disminución de la reacción, responsable del aumento súbito en la temperatura del gas.

El coeficiente de regresión lineal que acompaña al gráfico de comportamiento de temperatura, muestra que la generación de hidrógeno es directamente proporcional con el tiempo, por lo que la conversión del calor de reacción captado puede generar electricidad en forma directamente proporcional en función del tiempo.

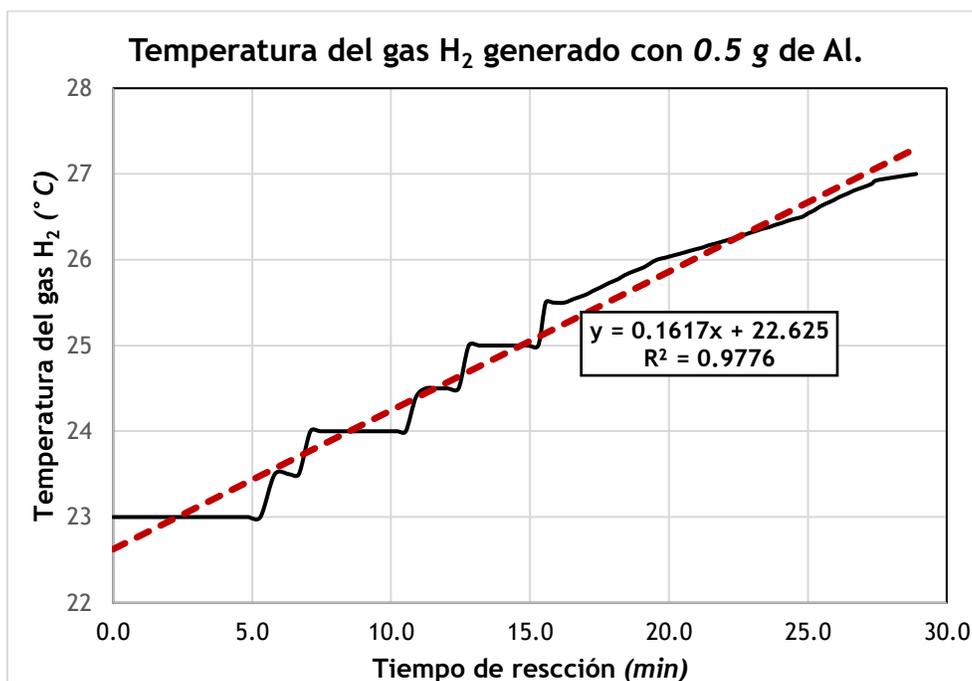


Figura 4.2.[3]. Comportamiento de la temperatura del gas en la producción de H₂ en matraz con 0.5 g de aluminio junto con la regresión lineal correspondiente.

A continuación se tratan los resultados correspondientes a la generación en matraz de hidrógeno generado por 1 g de aluminio. En la Figura 4.2.[4] se presentan las corridas efectuadas en la generación en matraz de hidrógeno con 1 g de aluminio como reactivo limitante. Se aprecia que las curvas se encuentran dispares en comparación con las de la figura 4.2.[1]. Las diferencias experimentales radican en las condiciones atmosféricas presentes a lo largo del día de la experimentación, dado que al paulatino ascenso del Sol la temperatura a lo largo del día varía sensiblemente, lo que podría explicar la el aumento de la velocidad de reacción en tanto la temperatura ambiente aumenta, además de considerar que los volúmenes de generación son los mismos.

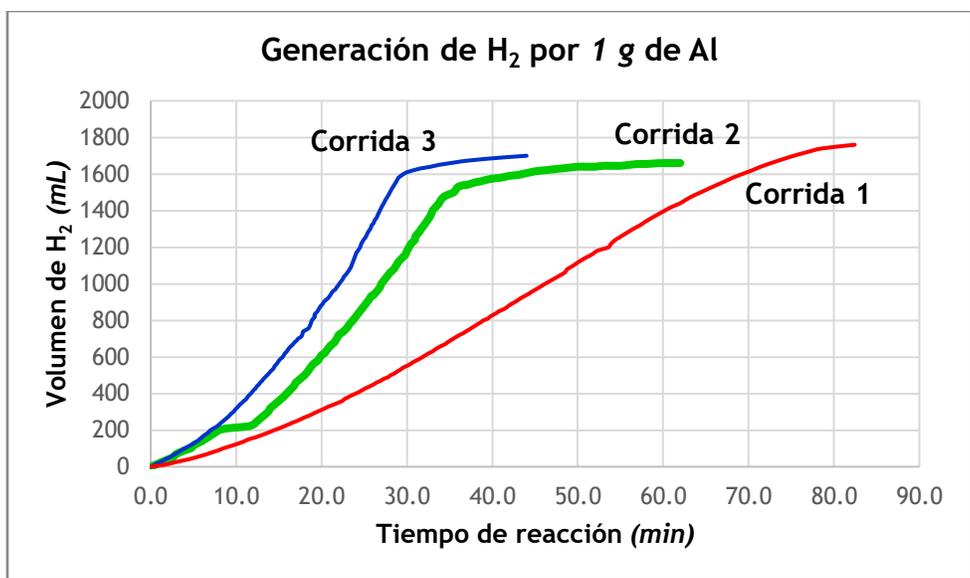


Figura 4.2.[4]. Representación de las corridas en la producción de H₂ en matraz con 1 g de aluminio.

El comportamiento en la generación de hidrógeno en matraz se refleja en un solo gráfico en la Figura 4.2.[5]. Aquí se representa gráficamente la regresión lineal con un coeficiente de correlación de 0.9857, así como gráficamente la desviación estándar. El coeficiente arrojado por el análisis indica que la producción de hidrógeno es directamente proporcional al tiempo e independiente a las condiciones atmosféricas presentes al momento de la reacción.

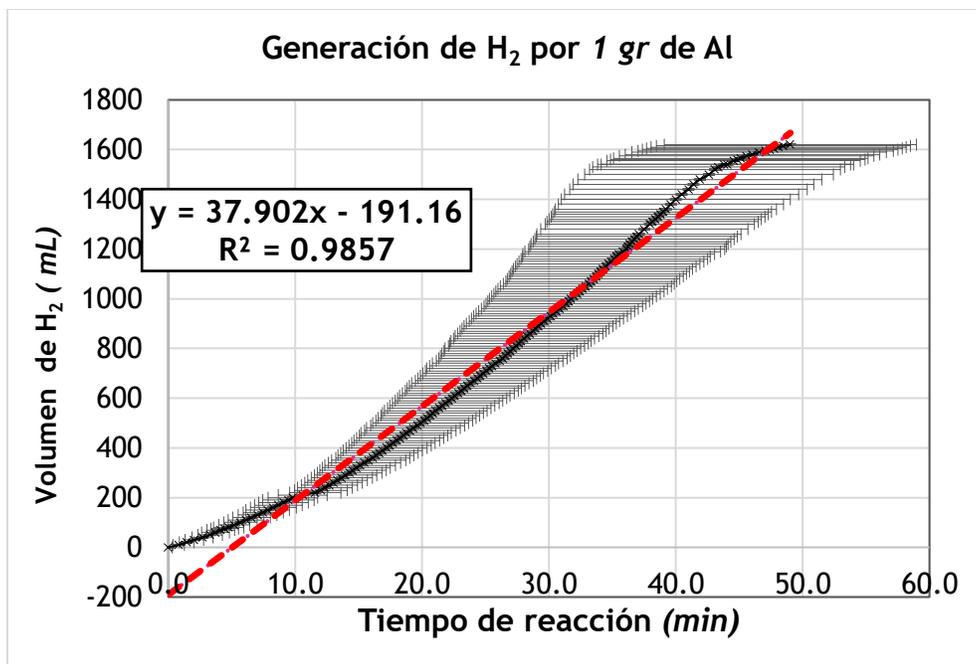


Figura 4.2.[5]. Producción de H₂ en matraz con 1 g de aluminio junto con la regresión lineal correspondiente.

En la Figura 4.5.[6] se presentan los comportamientos del incremento de temperaturas en cada una de las corridas efectuadas. En estos comportamientos se aprecia que al inicia de la Corrida 1 la temperatura del gas no aumenta de la misma forma que las otras dos a lo largo del tiempo, lo que igualmente explica el retraso relativo en la producción de hidrógeno.

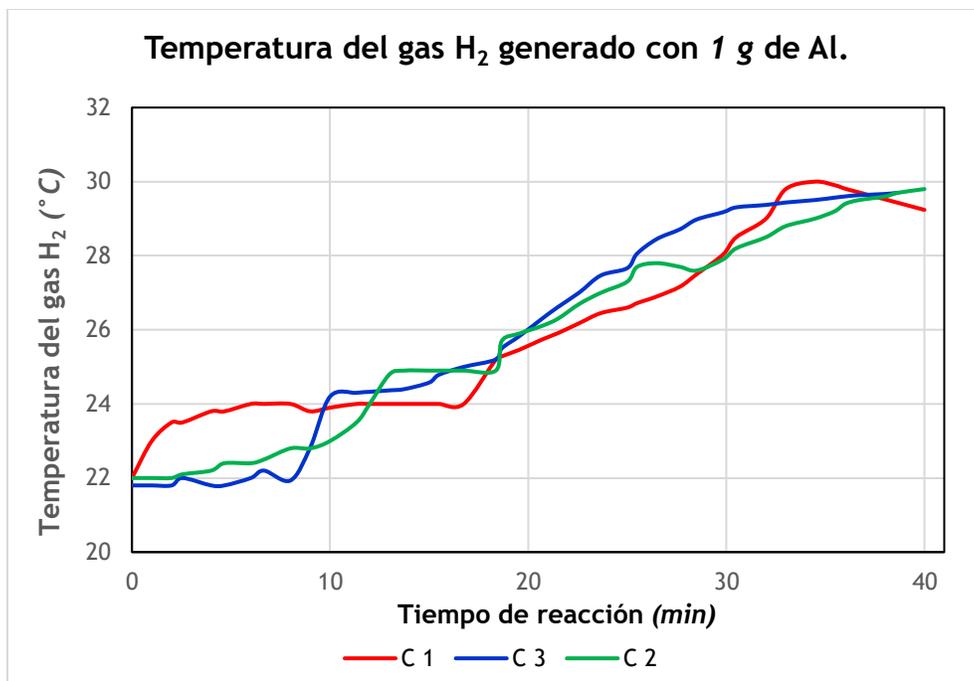


Figura 4.2.[6]. Comportamiento de la temperatura del gas en la producción de H_2 en matraz con 1 g de aluminio en cada una de las corridas efectuadas.

En la Figura 4.2.[7] se muestra el incremento de la temperatura del gas resultado de la producción de hidrógeno molecular, junto con los datos de su regresión lineal y desviación estándar. Dado que el coeficiente de regresión lineal es de 0.9865, se establece que en el periodo de 0 min a 40 minutos, la relación de producción de hidrógeno es directamente proporcional al tiempo de reacción empleando 1 gr de aluminio como reactivo limitante.

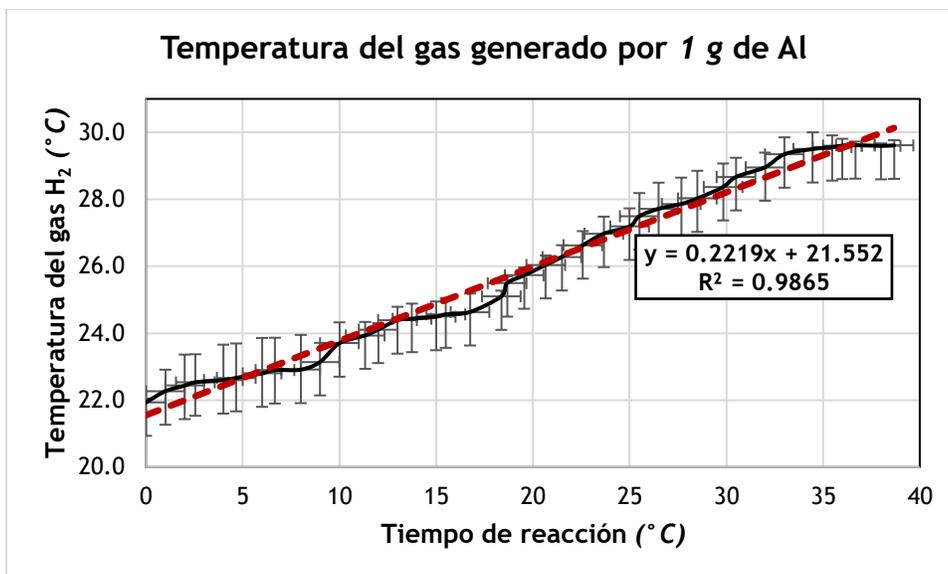


Figura 4.2.[7]. Comportamiento de la temperatura del gas en la producción de H₂ en matraz con 1 g de aluminio en cada una de las corridas efectuadas.

Al emplear la cantidad de 1.5 g de aluminio para la generación experimental de hidrógeno en matraz en base a la ecuación química 3.1.1.[1], se obtienen los resultados mostrados en la Figura 4.2.[8].

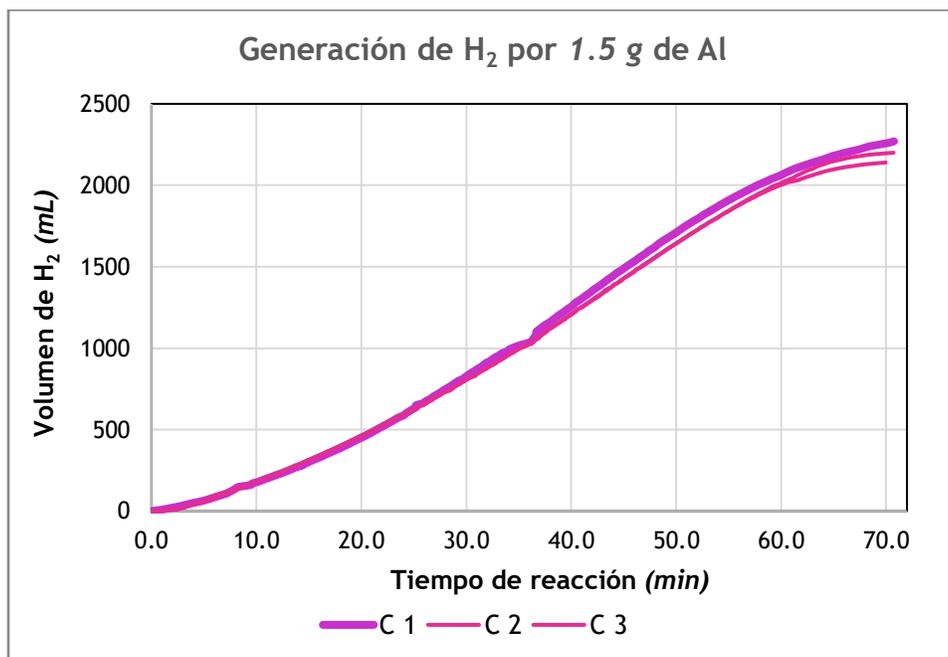


Figura 4.2.[8]. Representación de las corridas (C) en la producción de H₂ en matraz con 1.5 g de aluminio.

En la Figura 4.2.[9] se presenta el comportamiento de generación de hidrógeno a lo largo del tiempo de reacción. Se observa que la curva describe una recta con un coeficiente de correlación lineal de 0.9873. Esto permite establecer la relación lineal de la producción de hidrógeno constante en los primeros 80 minutos de reacción con 1.5 g de aluminio como reactivo limitante en una solución de NaOH al 20 % adicional de lo establecido estequiométricamente.

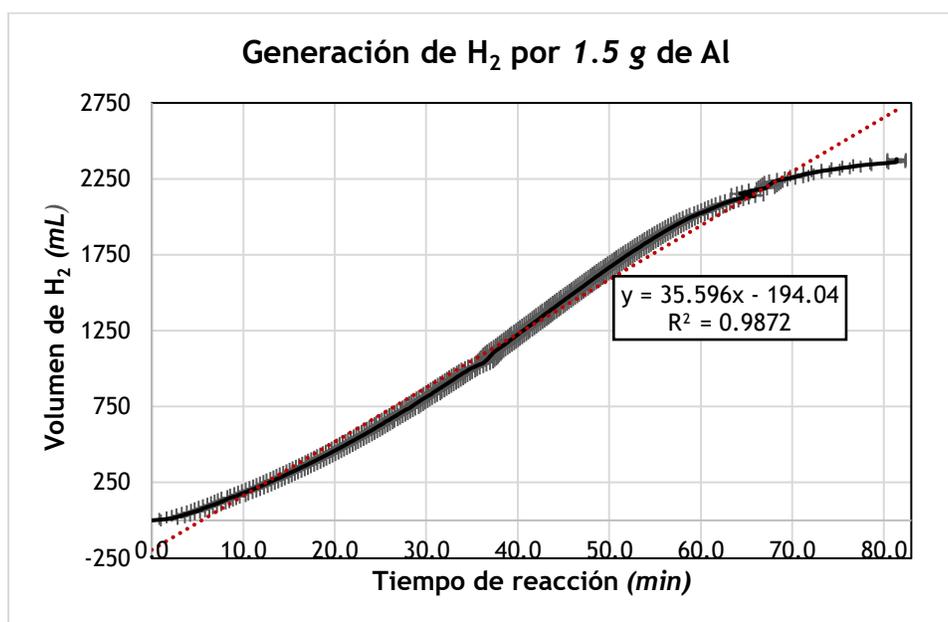


Figura 4.2.[9]. Producción de H₂ en matraz con 1 g de aluminio junto con la regresión lineal correspondiente.

Las temperaturas observadas en el gas en la producción de hidrógeno generado a partir de 1.5 g de aluminio, se presentan en la Figura 4.2.[10]

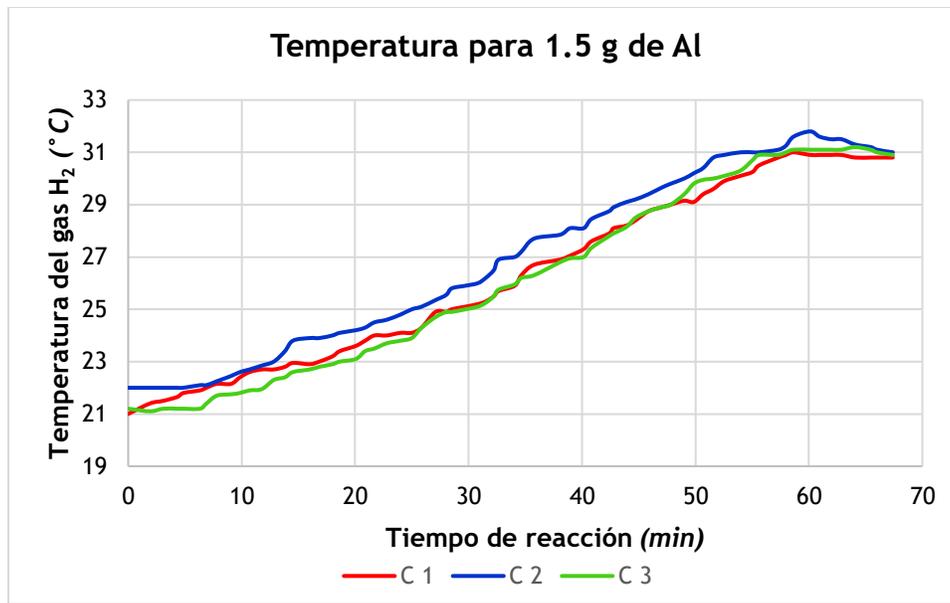


Figura 4.2.[10]. Comportamiento de la temperatura del gas en la producción de H_2 en matraz con 1.5 g de aluminio en cada una de las corridas (C) efectuadas.

En el comportamiento de la temperatura mostrado en la Figura 4.2.[11] a partir de la producción de hidrógeno a partir de 1.5 g de aluminio, se observa que la relación nuevamente se comporta lineal con respecto al tiempo de reacción, con un incremento de la temperatura más constante en comparación con las pruebas anteriores del presente capítulo.

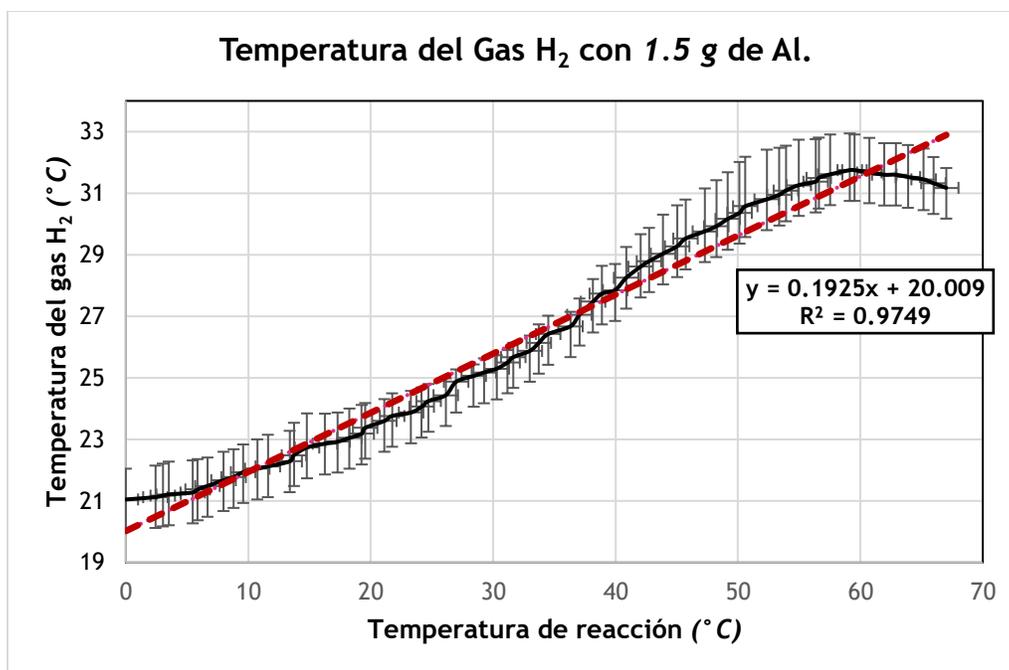


Figura 4.2.[11]. Comportamiento de la temperatura del gas en la producción de H₂ en matraz con 1.5 g de aluminio en cada una de las corridas efectuadas.

En la producción de hidrógeno a partir de 2 g de aluminio en apego a la ecuación química 3.1.1.[1], se presenta la Figura 4.2.[12]. En ésta figura se muestran las tres corridas efectuadas bajo las mismas condiciones de presión y temperatura. Al término de 60 minutos de reacción, todas las curvas convergen a un mismo valor final respecto al volumen producido, que es de 3300 mL Sin embargo, para fines estadísticos, se trabaja con los datos arrojados solo en los primeros 43 minutos de reacción, considerando que a partir de éste tiempo el comportamiento de la producción de hidrógeno entra en un estado de estabilidad.

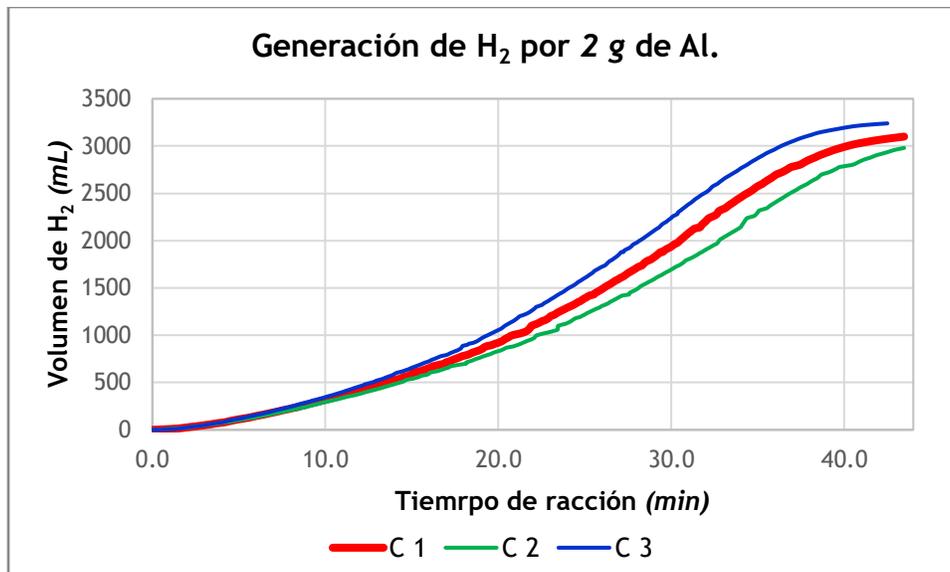


Figura 4.2.[12]. Representación de las corridas (C) en la producción de H₂ en matraz con 2 g de aluminio.

En la Figura 4.2.[13] se presenta el comportamiento de la producción de hidrógeno en los primeros 43 minutos de reacción, a partir del empleo de 2 g de aluminio tratado proveniente latas de desecho de bebidas. Igualmente, se presenta la desviación estándar para el tiempo en el que se registra cada volumen generado de gas. Se observa que la línea de tendencia lineal tiene un coeficiente de regresión lineal de 0.9658, lo que indica una tendencia a un comportamiento lineal en la producción de hidrógeno en relación al tiempo de reacción.

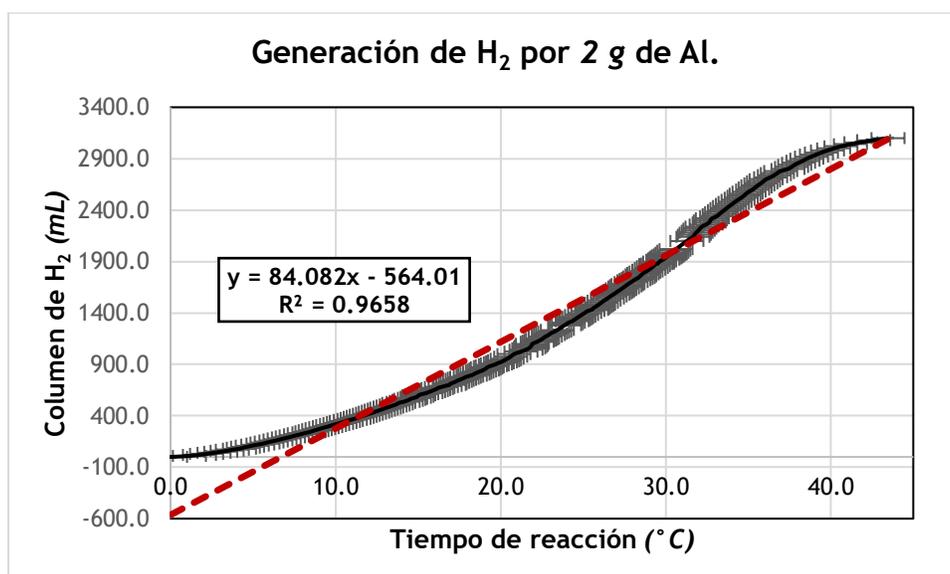


Figura 4.2.[13]. Producción de H_2 en matraz con 2 g de aluminio junto con la regresión lineal correspondiente.

Las temperaturas registradas durante la generación de hidrógeno a partir de 3.1.1.[1] empleando 2 g de aluminio, se muestra en la Figura 4.2.[14].

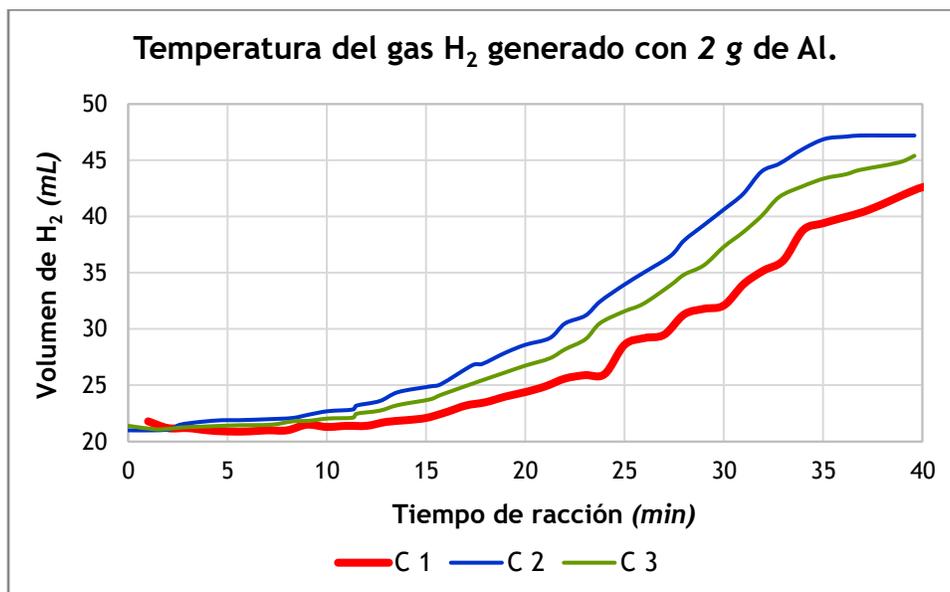


Figura 4.2.[14]. Comportamiento de la temperatura del gas en la producción de H_2 en matraz con 2 g de aluminio en cada una de las corridas efectuadas.

En la Figura 4.2.[15] se presenta la curva de comportamiento del incremento de calor para el gas generado en 3.1.1.[1] a partir de 2 gr de aluminio.

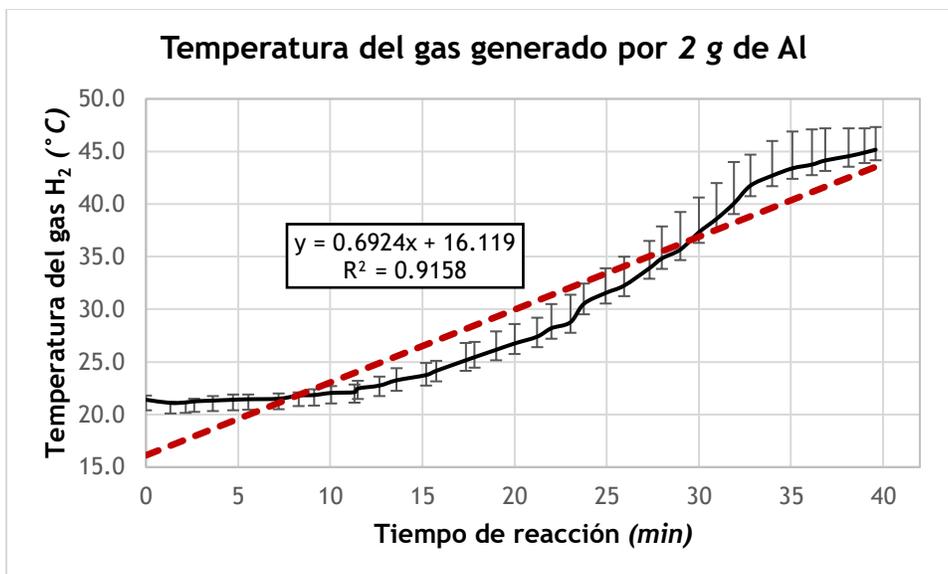


Figura 4.2.[15]. Comportamiento de la temperatura del gas en la producción de H₂ en matraz con 2 g de aluminio en cada una de las g efectuadas.

Finalmente se muestra en la Figura 4.2.[16] la generación de hidrógeno a partir de 2.5 g de aluminio, en donde se observa que la generación de hidrógeno entra en su fase de estabilización hasta el minuto 30.

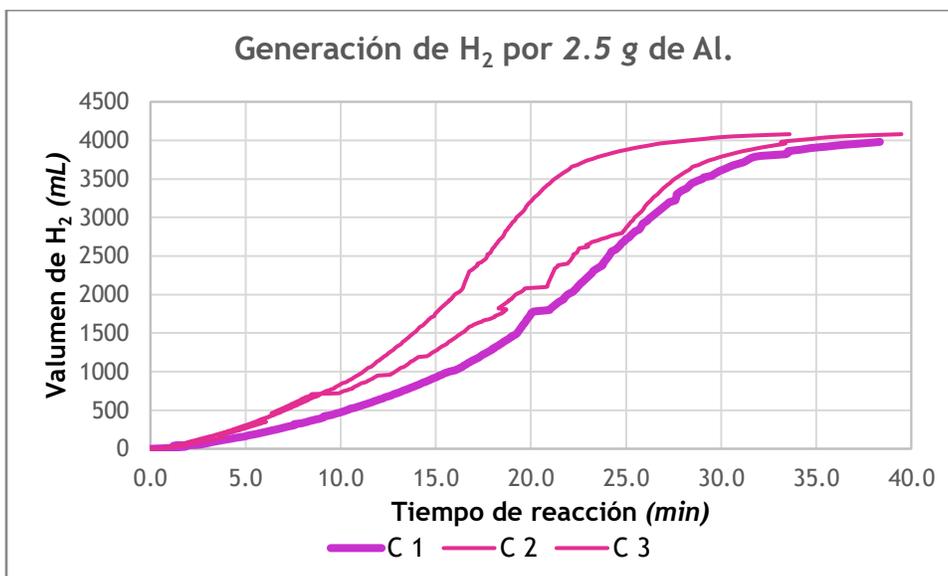


Figura 4.2.[16]. Representación de las corridas en la producción de H₂ en matraz con 2.5 g de aluminio.

En la figura 4.2.[17] se presenta la gráfica que describe el comportamiento de la generación de hidrógeno a partir de 2.5 g de aluminio. Se muestra igualmente la

desviación estándar y el coeficiente de correlación lineal, que es de 0.956, que establece una tendencia a la proporción lineal que tiene la producción de hidrógeno en base a 3.1.1.[1] y el tiempo de reacción.

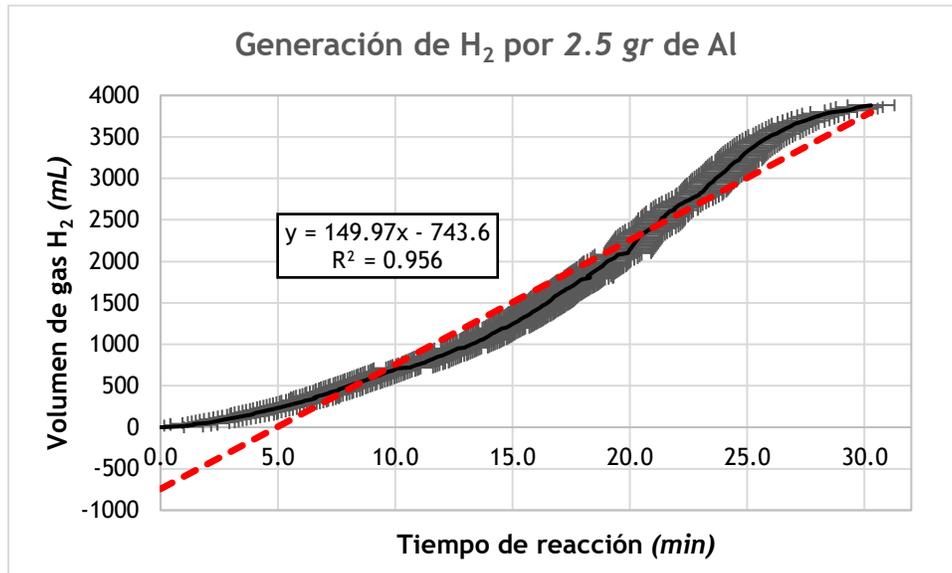


Figura 4.2.[17]. Producción de H₂ en matraz con 2.5 g de aluminio junto con la regresión lineal correspondiente.

El comportamiento de la temperatura del gas en la producción de hidrógeno se muestra en la figura 4.2.[18], en la cual se observa un comportamiento tendiente a la linealidad, como lo indica su coeficiente de correlación lineal de 0.853.

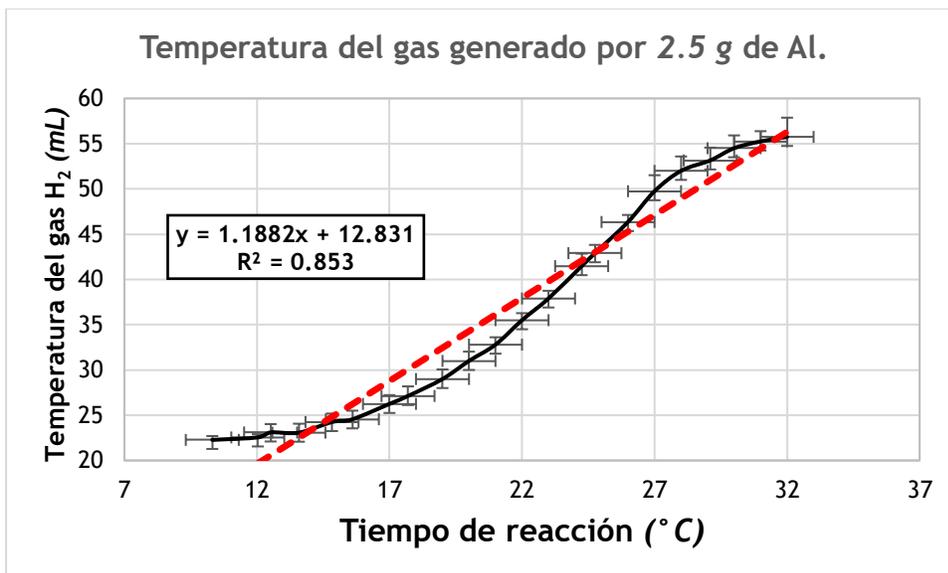


Figura 4.2.[7]. Comportamiento de la temperatura del gas en la producción de H₂ en matraz con 2.5 g de aluminio en cada una de las corridas efectuadas.

4.3. Análisis de la mejor propuesta técnica para la separación del NaOH de la corriente de gas generada a partir de 3.1.1.[1].

Se realiza el análisis bibliográfico para proponer técnicas de separación de hidróxido de sodio y de la humedad que acompañan a la corriente de gas hidrógeno. Las técnicas propuestas se mencionan a continuación.

- a) Tratamiento de gas por bagazo de caña empacado en columna.
- b) Adsorción de humedad con silicato de alumna.
- c) Tratamiento de gas con carbón activado.
- d) Tratamiento de gas con zeolita.
- e) Tratamiento de gas con dolomita calcinada.
- f) Remoción de sodio de gas caliente (600 °C).
- g) Sílica, epatita (1000 °C).

El formato de la Tabla 3.4.[4], se requisita con los criterios de separación de hidróxido de sodio o humedad presentes en una corriente de gas, los cuales fueron mencionado arriba, quedando la tabla referida como se presenta a continuación.

Id.	Técnica para la reducción de su carácter ácido a la corriente de gas proveniente de 3.1.1.[1]	Calificación de criterios de evaluación.							Evaluación	
		Costo	Energía	Eficiencia	Probabilidad	Tecnología	Seguridad	Ambiente		Regeneración
1	Tratamiento de gas por bagazo de caña empacado en columna.	4	3	3	4	3	4	4	4	26
2	Adsorción de humedad con silicato de alumna.	4	4	3	4	3	4	4	4	30

3	Tratamiento de gas con carbón activado.	2	2	4	4	3	3	4	3	25
4	Tratamiento de gas con zeolita.	3	4	3	4	2	3	4	2	25
5	Tratamiento de gas con dolomita calcinada.	2	1	3	4	3	4	4	3	24
6	Remoción de sodio de gas caliente (600 °C).	1	3	2	1	1	1	4	3	16
7	Sílica, epatita (1000 °C).	1	3	2	1	1	1	4	3	16
8	Adsorción en columna de agua.	4	4	2	1	4	4	4	4	27

En apego a la metodología descrita para la presente evaluación, se consideran como las dos mejores propuestas a: **a) Adsorción en columna de agua**, y **b) Adsorción de humedad con silicato de alumina**. Debido al resultado arrojado, se realizan trabajos experimentales en laboratorio para conocer la aplicabilidad de éstas dos técnicas en el presente trabajo y en apego a los objetivos planteados para la misma.

4.4. Separación del hidróxido de sodio de la corriente de gas, mediante columna de adsorción.

En el presente apartado nos enfocamos en la reducción del NaOH presente en la corriente de gas generado mediante 3.1.1.[1], con la finalidad de evitar daños a la PEMFC a emplear la cual tiene carácter ácido. Dada la importancia del posible daño infringido a la PEMFC a causa de la presencia de NaOH en la corriente de gas suministrada, es que se establece que si no se cumple con el objetivo del retiro del material, no se ensambla la PEMFC al Sistema de Producción de Hidrógeno.

4.4.1. Agua como adsorbente de hidróxido de sodio.

En apego al procedimiento 3.5.1. del presente trabajo, se realiza la experimentación en donde se pretende retirar hidróxido de sodio adsorbiéndolo en columnas de agua. Se emplearon 3 columnas de agua en serie con una altura conjunta de *60 cm* y un diámetro interior de *2.5 cm*. La mezcla de gas se obtiene de 3.1.1.[1] empleando *1 g* de aluminio

pretratado y 100 mL de H₂O·QP con hidróxido de sodio con 20 % de exceso del requerido estequiométricamente. La reacción se permitió durante 60 minutos.

Se toman lecturas iniciales de *pH* del H₂O·QP de cada una de las probetas y al finalizar la reacción, así como de sus respectivas temperaturas. Los resultados se muestran en la Tabla 4.4.1.[1].

Tabla 4.4.1.[1]. Lecturas de *pH* iniciales y finales de las columnas de adsorción con agua.

Columna	1	2	3	Desviación estándar	Error porcentual
<i>pH</i> inicial	6.42	6.70	6.55	0.14	2.1
<i>pH</i> final	8.91	8.61	8.24	0.34	1.3
Temp. inicial (°C)	21.4	21.5	21.4	0.06	0.3
Temp. final (°C)	21.8	21.7	21.8	0.06	0.3

Se observa que los niveles de *pH* presentes en las columnas de agua al finalizar la reacción, aumentan en promedio 2.1 unidades de *pH*. Así mismo, se observa que el *pH* de las columnas iniciales es menor con respecto a las columnas finales. Esto nos establece que en la columna de agua se adsorbe hidróxidos de sodio. Sin embargo, se observa que la basicidad de la solución gaseosa no se elimina totalmente, sino que va disminuyendo de columna en columna. Si continuamos ésta proyección, identificamos que se requieren de 11 columnas de agua de estas dimensiones, lo que se traduce en una columna de agua de 2.5 cm de ancho por 220 cm de largo.

Debido a lo anterior, se descarta la posibilidad de emplear columnas de agua químicamente pura para la disminución del carácter básico de la mezcla de gases generada a partir de 3.1.1.[1]. Lo anterior se establece dado que se desconoce la cantidad total de NaOH presente en la corriente de gas, no se sabe cuánto NaOH se está retirando de la mezcla de gas y si esto es suficiente como para asegurar que dicha corriente contiene la concentración de NaOH requerida para no dañar a la PEMFC a emplear. Así mismo, las dimensiones previstas de la columna de adsorción necesaria para la eliminación del carácter básico de la corriente de gas, causan que el Sistema de

Producción de Hidrógeno limite sus capacidades de transportación y pueda ser empleado *in situ*.

Por lo anterior, es que se considera a la presente técnica como no adecuada para la remoción del hidróxido de sodio de la corriente de gas hidrógeno generado a partir de 3.1.1.[1].

4.4.2. Columna de agua con agente mecánico de adsorción.

Se realizan las pruebas por triplicado, se encuentran los *pH* que tiene el agua en la columna de adsorción antes y después de cada una de las pruebas. Los resultados se presentan en la Tabla 4.4.2.[1].

Tabla 4.4.2.[1]. Lecturas de *pH* iniciales y finales de las columnas de adsorción con agua.

Columna	1	2	3	Desviación estándar	Error porcentual
<i>pH</i> inicial	5.72	5.70	6.12	0.24	4.1
<i>pH</i> final	8.54	8.31	9.21	0.47	5.4
Temp. inicial (°C)	20.7	21.2	21.5	0.4	1.9
Temp. final (°C)	21.0	21.4	21.7	0.35	1.6

En la tabla anterior se puede observar que la cantidad de hidróxido de sodio es semejante a la reportada en la Tabla 4.4.1.[1]. La técnica evaluada se establece como impráctica por la relativa baja eliminación de hidróxido de sodio proveniente de 3.1.1.[1]. La columna de agua requerida para la remoción cuantificada en esta misma prueba requieres de 2.7 metros de altura.

4.4.3. Silicato de alúmina como adsorbente de humedad.

Se realiza la técnica de columna de adsorción para la captura de la humedad en la que se encuentra disuelto el hidróxido de sodio y que acompaña a la corriente de gas hidrógeno. Para conocer lo anterior se mide el *pH* de la columna testigo antes y después

de la reacción. Los resultados se muestran en la Tabla 4.4.3.[1]. Las condiciones de reacción de esta prueba se mencionan a continuación.

Condiciones de reacción.

- 2 g de Al.
- Solución: NaOH con 20 % de exceso del requerimiento estequiométrico.
- Tiempo de reacción: 60 min.
- Columna de adsorción: 175 g de silicato de alúmina empacada en cilindro de PVC de 1 m por $\frac{3}{4}$ pulg.
- Columna testigo: 100 mL de H₂O-QP en probeta de 100 mL de capacidad.
- Se realizaron tres pruebas independientes en cada condición propuesta.

Tabla 4.4.3.[1]. Mediciones del *pH* en la columna testigo (CT). En (a) no se emplea la columna de adsorción y en (b) sí se emplea la columna de adsorción.

Corrida (a)	1	2	3	Desviación Estándar	Error porcentual
<i>pH</i> inicial CT	4.73	4.72	4.7	0.02	0.3
<i>pH</i> final CT	11.3	11.7	11.9	0.31	2.6
ΔpH	6.57	6.98	7.02	0.25	3.6

Corrida (b)	1	2	3	Desviación Estándar	Error porcentual
<i>pH</i> inicial CT	5.3	5.3	5.11	0.11	2.1
<i>pH</i> final CT	11.07	10.3	11.26	0.51	4.7
ΔpH	5.77	5.00	6.15	0.59	10.4

Se aprecia que en las corridas experimentales en las que no se emplea la columna de adsorción con silicato de alúmina, el *pH* de la columna testigo aumenta entre 6.6 y 7.0 unidades, en tanto que en las corridas experimentales en las que sí se emplea la columna de adsorción con la silicato de alúmina, hay un aumento de *pH* entre 5.8 y 6.2 unidades. Esto indica que la columna de adsorción sí tiene una adsorción del agua en la que se

encuentra disuelto el hidróxido de sodio. El silicato de alúmina es higroscópico, por lo que se espera que esté adsorbiendo humedad de la corriente de hidrógeno, humedad en la que va disuelto el hidróxido de sodio, dado que es el único agente básico presente en la reacción que tiene la facultad de cambiar el *pH* de la columna testigo, es cual es retenido en alguna medida en el silicato de alúmina de la columna empacada.

4.5. Efecto Siebeck.

En este apartado se presentan los resultados sobre la transferencia de calor con el fin último de convertirlo en energía eléctrica. Esta transformación de energía se lleva a cabo a través de los módulos termoeléctricos (TEM) llamados Placas Peltier, de las cuales se cuentan con dos con diferentes modelos. Dado que se realiza una caracterización a las cuatro lacas, es conveniente otorgarles un código, con el fin de hacer más sencilla su referencia, por lo que en la Tabla 4.5.[1], se referencía cada TEM a su modelo establecido por el fabricante.

Tabla 4.5.(1). Codificación de cada TEM empleados.

Código	Modelo
TEM – A – 1	TEMC1-127-09
TEM – A – 2	TEMC1-127-09
TEM – B – 1	TEMC1-127-15
TEM – B – 2	TEMC1-127-15

4.5.1. Pruebas de Torque.

Se realizan las experimentaciones establecidas en el procedimiento 3.6.1. para conocer la fuerza de presión requerida para asegurar el contacto óptimo entre la TEM y el cuerpo que irradia el calor de reacción. En la Tabla 4.5.1.[1] se presentan los resultados de las experimentaciones.

Tabla 4.5.1.[1]. Torques al ensamble de prueba para aumentar el contacto y la transferencia de calor.

ID TEM	T _c (°C)	T _f (°C)	ΔT (°C)	Torque (lb pl ²)	Potencia máxima, P _{max} (W)				
					Corridas			Desviación estándar	Error porcentual
					1	2	3		
TEM-A-1	65	4	61	5	0.5345	0.5366	0.5374	0.0448	8.4
				10	0.6353	0.6350	0.6346		
				15	0.6447	0.6466	0.6468		
				20	0.6132	0.6130	0.6150		

TC – Temperatura caliente. Tf – Temperatura fría. ΔT – Gradiente de temperatura.

Se observa en la Tabla 4.5.1.[1] que el torque que permite la mayor eficiencia eléctrica que es de **0.6460 W** en promedio, es el torque de **15 lb pl²**. Este es el torque que se genera en cada uno de los 4 tornillos de sujeción.

4.5.2. Selección de las dos TEM de mejor rendimiento eléctrico.

Se cuenta con cuatro celdas Peltier para realizar la conversión de energía calorífica proveniente del calor de reacción, a energía eléctrica. Se proponen dos sitios en el cuerpo del reactor para realizar la transferencia de calor hacia las TEM y lograr nuestro objetivo. Se cuenta con dos modelos diferentes de TEM, un modelo es TEMC1-127-09 y el otro modelo es TEMC1-127-15. Dado que no fue posible encontrar la ficha técnica por el fabricante de cada modelo, se realizan pruebas de desempeño eléctrico a cada una de ellas a una sola diferencia de temperaturas, para encontrar así cuáles tienen mejor desempeño eléctrico, es decir, encontrando su potencia máxima a esa diferencia de temperatura.

Las condiciones de las pruebas se reflejan en la Tabla 4.5.2.(1), las cuales se hicieron por triplicado (corridas) para fines estadísticos, además de contener los datos resultados de la experimentación, en donde se presentan las potencias máximas a la mayor

diferencia de temperatura según el cálculo teórico efectuado inicialmente en el presente trabajo.

Tabla 4.5.2.(1). Potencia máxima de cada placa Peltier bajo una misma ΔT .

ID TEM	T_c (°C)	T_f (°C)	ΔT (°C)	Potencia máxima, P_{max} (W)				
				Corridas			Desviación estándar	Error porcentual
				1	2	3		
TEM-A-1	65	4	61	924.95	927.21	930.44	2.76	0.3
TEM-A-2				361.55	356.69	350.40	5.59	1.6
TEM-B-1				1448.96	1446.21	1446.03	1.64	0.1
TEM-B-2				1407.56	1401.90	1398.67	4.50	0.3

TC – Temperatura caliente. Tf – Temperatura fría. ΔT – Gradiente de temperatura.

Los dos mayores resultados de potencia máxima que se observan en las placas Peltier son **TEM-B-1** y **TEM-B-2**, por las que presentan mayor rendimiento eléctrico.

4.5.3. Caracterización de las TEM con mejor rendimiento eléctrico.

Se realiza la prueba de caracterización de la TEM-B-1 cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.5.3.[1]. Se decide caracterizar el TEM-B-1 por haber presentado la mayor potencia máxima y debido a que la diferencia de rendimiento varía en un 3.3 % por encima de la segunda TEM (TEM-B-2), con mejor potencial máximo reportado.

Tabla 4.5.3.[1]. Datos de la prueba de la caracterización eléctrica del TEM-B-1.

T_c (°C)	T_f (°C)	ΔT (°C)	OCP (V)	Potencia máxima, $P_{m\acute{a}x}$ (W)				
				Corrida			Media aritmética	Desviación Estándar
				1	2	3		
TC1	15	4	11	68.63	68.79	68.79	68.74	0.09
TC2	25		21	201.10	200.67	199.4	200.39	0.88
TC3	35		31	366.94	365.12	368.50	366.72	1.49
TC4	45		41	684.07	685.44	684.50	684.67	0.70
TC5	55		51	767.49	775.92	778.78	774.07	5.87
TC6	65		61	917.92	945.67	945.43	946.32	1.39

Es así como se obtienen los datos para la construcción de la curva de calibración mostrada en la Figura 4.5.3.[1].

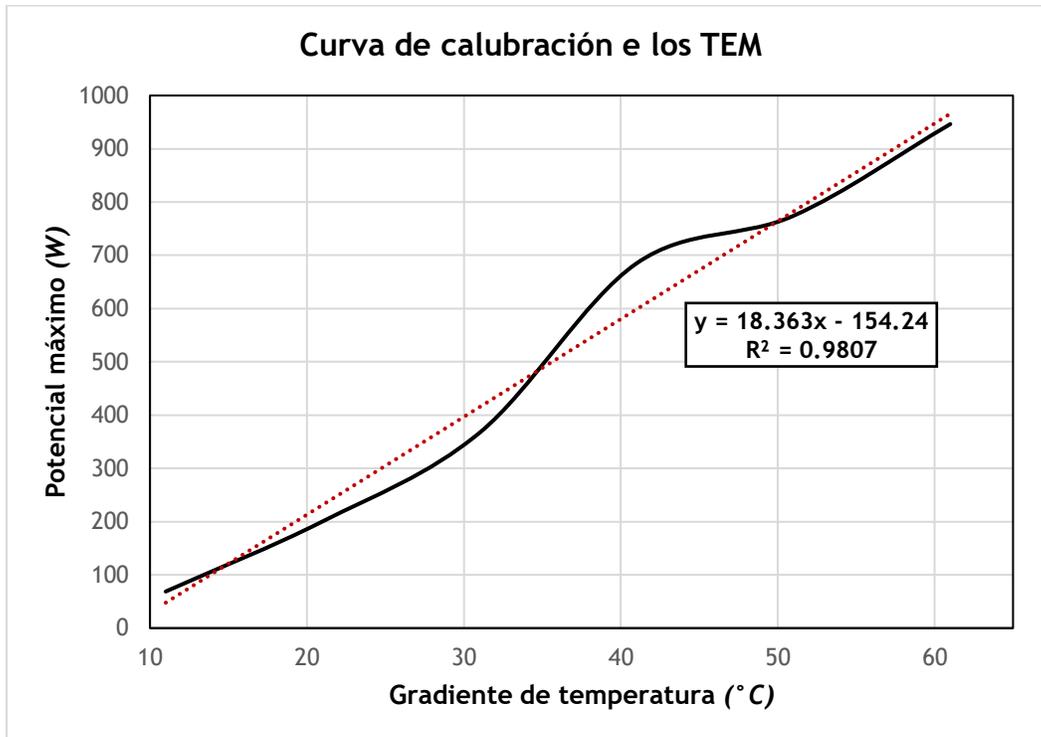


Figura 4.5.3.[1]. Curva de polarización de la módulo termoelectrico TEM-B-1. Como resultado del ajuste lineal de la curva presentada se obtiene la expresión 4.5.3.(1), que describe el comportamiento de la curva con un coeficiente de correlación de 0.9807.

$$P_m = 18.363 \Delta T - 154.24 \quad 4.5.3.(1)$$

Esta expresión se emplea más adelante para conocer el rendimiento de las TEM en funcionamiento en condiciones de trabajo experimental.

4.6. Pruebas de hermeticidad del Sistema de Producción de hidrógeno.

Para conocer el torque al que deben ir ajustados los pernos del reactor del SPH, se emplean los datos reportados en la Tabla 4.6.(1). En ésta misma tabla se presentan las

condiciones de trabajo y las condiciones de prueba propuesta en los que se realiza en procedimiento 3.7.

Tabla 4.6.(1). Condiciones de trabajo y para la prueba de hermeticidad del sistema de producción de H₂.

Parámetro	Condición de trabajo	Condición de prueba
Presión	6.8 atm	10 atm
Gas	H₂	N₂
Aluminio	10 g	0 g
H₂O_(l)	100 mL	0 mL

Una vez llevado a cabo el procedimiento 3.7. del presente trabajo, se establece que **el sistema de producción de hidrógeno no presenta ninguna fuga del material presurizado.**

CAPITULO 5

Conclusiones finales y recomendaciones.

- En base al análisis de balance de materia y energía se logra establecer la cantidad de materia y energía a obtener en base a la cantidad de reactivo que se desea emplear para la generación de hidrógeno.
- No es posible conocer la cantidad de hidróxido de sodio presente en la corriente de hidrógeno. Este dato debe conocer y analizar experimentalmente.
- Se propone un sistema de producción de hidrógeno capaz de aceptar los módulos termoeléctricos para la generación de energía a partir de la recuperación del calor de desecho, además de permitir acoplarse una celda de combustible para el aprovechamiento del hidrógeno generado.
- Se caracterizan adecuadamente los sistemas que permiten la generación de electricidad a partir de la reacción de generación de hidrógeno. Las curvas de polarización encontradas permiten obtener datos del comportamiento de cada uno de los dispositivos a emplear, logrando con esto conocer datos de importancia para obtener el mejor rendimiento eléctrico posible.
- Se realizaron las pruebas proyectadas en el presente trabajo para la eliminación del hidróxido de sodio presente en la corriente de gas, sin embargo, ninguna de las técnicas empleadas logra retirar la cantidad suficiente de hidróxido de sodio y asegurar con ello que la celda de combustible con carácter ácido no se dañe y permita lograr su mayor eficiencia eléctrica en las condiciones de trabajo.
- Se establece una secuencia de proceso coherente y funcional para la operación del sistema de generación de hidrógeno a partir de aluminio proveniente de latas de desecho y agua en presencia hidróxido de sodio como catalizador.
- Las placas Peltier son integradas al sistema de generación adecuadamente, aislándolas térmicamente para su mejor desempeño eléctrico durante el tiempo de

reacción y estabilización térmica una vez terminada la reacción.

- No se realizó la conexión de la celda de combustible en el sistema de producción de hidrógeno, debido a que la corriente de gas no se encuentra libre de hidróxido de sodio que daña a la celda permanentemente.
- Se debe encontrar un sistema económico, portátil y eficiente que permita liberar a la corriente de hidrógeno de la presencia del hidróxido de sodio.
- Se integra y caracteriza en sistema de producción de hidrógeno únicamente con las placas Peltier como generadoras de electricidad. La caracterización de las placas Peltier tiene un rendimiento que depende en gran medida de la temperatura a emplear que permite el gradiente de temperatura necesario para la generación de energía.

Bibliografía.

[1] UNESCO Montevideo, Cyranek G., Consejero de Comunicación e Información para el MERCOSUR; Chile Plataforma RELAC SUR/IDRC Silva U., Investigadora Responsable; “Los residuos electrónicos: Un desafío para la Sociedad del Conocimiento en América Latina y el Caribe”.

[2] Cyranek G., Silva U. “Los residuos electrónicos: un desafío para la Sociedad del Conocimiento en América Latina y el Caribe”. UNESCO, 2010. Uruguay, Montevideo. Página electrónica: <http://www.unesco.org.uy/ci/fileadmin/comunicacion-informacion/LibroE-Basura-web.pdf>.

[3] BENITEZ M.; INFANTE T.; “Historia de la computación y estructura de un computador”; 2001.

[4] Prince A.; “Recupero y Reciclado de PC’S en LAC”; Plataforma RELAC SUR/ IDRC (2006).

[5] Steubing B.; “Generación de residuos electrónicos en Chile, Análisis de la situación actual y estimación presente y futura de los volúmenes de residuos de computadores, utilizando el modelo de flujo de materiales”; Tesis de Maestría (julio 2007), School of Architecture, Civil and Environmental Engineering (ENAC), Institute of Environmental Science and Technology (ISTE), Environmental Sciences and Engineering Section (SSIE), Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL).

[6] Diario Oficial de la Federación (2007). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2003. Última modificación. México, 19 de junio.

[7] Weiyue Q., Xinhui B., Guoying S., Shaoyou L., Jiamo F., Jing Y. y Liping L. “Exposure to polybrominated diphenyl ethers among workers at an electronic waste dismantling region in Guangdong, China. Environment International”, 2007; 33:1029-1034.

[8] Wong M., Wu S., Deng W., Yu X., Luo Q., Leung A., Wong C., Luksemburg W., Wong A. Export of toxic chemicals. A review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling. Environmental Pollution, 2007; 149:131-140.

- [9] Yu X., Gao Y., Wu S., Zhang H., Cheung K. and Wong M. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils at Guiyu area of China, affected by recycling of electronic waste using primitive technologies. *Chemosphere*, 2005; 65:1500-1509.
- [10] Hidalgo Aguilera L.; “La basura electrónica y la contaminación ambiental”; Universidad Tecnológica Equinoccial 2010.
- [11] Zhang S., Forssberg E., Van Houwelingen J., Rem P. and Wei L. End-of-life electric and electronic equipment management towards the 21st century. *Waste Manage Res.* 2000; 18:73-85
- [12] Sinha-Khetriwal. A comparison of electronic waste recycling in Switzerland and in India. *Environmental Impact Assessment Review.* 2005; 25:492– 504.
- [13] Rojas Bracho L.; Gavilán García A.; Alcántara Concepción V.; Cano Robles F.; “Los residuos electrónicos en México y el mundo”; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
- [14] Alvarado Hernández L.; Alonso A.R.; Lapidus G.T.; “Recuperación de plomo a partir de materiales de desecho provenientes de análisis de materiales por vía seca.”; Depto. Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- [15] Pinto V.N.; Patil D.; E-waste hazard: The impending challenge, *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine.*12, 65-70.
- [16] Chatterjee S.; Hagelüken K.; Effective electronic waste management and recycling process involving formal and non-formal sectors. *International Journal of Physical Sciences.* 893-905.
- [17] Hall, W.J.; Williams, P.T.,”Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards”. *Resources, Conservation and recycling.* 51, 691-709 (2007).
- [18] Rosales J.; Gestión integral y reciclaje de ewaste: Experiencias en Ecuador, Manejo de desechos tecnológicos (pp.1-2).
- [19] Baker E.; Bournay, E. ; Heberlein C.; Haramaya A.; Rekacewicz P.; Vital Waste Graphics. Recuperado de <http://www.grida.no/files/publications/vital-waste/waste%20report-full.pdf>.

[20] RECYCLA Chile S.A.; Residuos Electrónicos La Nueva Basura del Siglo XXI. Santiago, Chile.; Editorial Fundación Casa de la Paz.

[21] Veit HM, Diehl TR, Salami AP, et al. "Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap". Waste Management 25, 67-74 (2005).

[22] Periódico "EL PAIS"; en su artículo "La cantidad de basura electrónica aumentará un 33% en cinco años", publicado el lunes 16 de diciembre de 2013.

[23] PUCKETT J. & SMITH T. (2002): *Exporting harm: The high-tech trashing of Asia*. The Basel Action Network. Seattle: Silicon Valley Toxics Coalition.

[24] CULVER J. (2005): The life cycle of a CPU. (<http://www.cpushack.net/life-cycle-of-cpu.html>.)

[25] Montero Bermúdez R.; Proyecto de tesis para el grado de licenciatura; "Diseño del proceso de recuperación de metales de procesadores y tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas mediante lixiviación en columna." Diciembre 2012.

[26] Lindhqvist T.; Manomaivibool P.; Tojo N.; "La responsabilidad extendida del productor en el contexto latinoamericano. La gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Argentina.

[27] Ott, D., 2008. Gestión de residuos electrónicos en Colombia - Diagnóstico de computadores y teléfonos celulares. EMPA. Robinson, B.H., 2009. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. Sci. Total Environ. 408, 183–191.; Sthiannopkao, S., Wong, M.H., 2012. Handling e-waste in developed and developing countries: Initiatives, practices, and consequences. Sci. Total Environ.

[28] Housecroft E. Catherine; Sharpe G. Alan; "Química Inorgánica" Edit. Pearson, Prentice Hall 2da. Edición.

[29] Vélez Á. paulo ingeniero electrónico; artículo "E-WASTE: La basura del siglo XXI, ¿qué hacer con ella?"

[30] Montero Bermúdez R.; Proyecto de tesis para el grado de licenciatura; "Diseño del proceso de recuperación de metales de procesadores y tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas mediante lixiviación en columna." Diciembre 2012.

[31] Khandpur R.; (2006). "Printed Circuit Boards: Design, Fabrication and Testing. New York, Estado Unidos, Editorial McGraw-Hill.

[32] Kepro Circuit Systems, Manual de Instrucciones, Estados Unidos.

[33] Chaverra Arias E.; "Extracción de cobre a partir de tarjetas de circuito impreso de residuos electrónicos".

[34] Páginas de Información Ambiental; N°30, "Qué hacer con la basura electrónica", Diciembre 2008

[35] Lindqvist T.; Manomaivibool P.; Tojo N.; "La responsabilidad extendida del productor en el contexto latinoamericano. La gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Argentina.

[36] Aguayo Olivia. Lucha la ONU contra e-basura. Reforma (México D.F., México). Marzo 12, 2007.

[37] Daniel Santiago. El camino que sigue tu basura electrónica. El Norte (México D.F., México). Enero 23, 2008

[38] Lindqvist T.; Manomaivibool P.; Tojo N.; "La responsabilidad extendida del productor en el contexto latinoamericano. La gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Argentina.

[39] Das, A., Vidyadhar, A., Mehrotra, S.P., 2009. A novel flowsheet for the recovery of metal values from waste printed circuit boards.

Duan, C., Wen, X., Shi, C., Zhao, Y., Wen, B., He, Y., 2009. Recovery of metals from waste printed circuit boards by a mechanical method using a water medium. J. Hazard. Mater. 166, 478–482.

Guo, C., Wang, H., Liang, W., Fu, J., Yi, X., 2011. Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board (PCB). Waste Manag. 31, 2161–2166.

Ogunniyi, I.O., Vermaak, M.K.G., 2009. Investigation of froth flotation for beneficiation of printed circuit board comminution fines. Miner. Eng. 22, 378–385.

[40] Long Le, H., Jeong, J., Lee, J.-C., Pandey, B.D., Yoo, J.-M., Huyenh, T.H., 2011. Hydrometallurgical process for copper recovery from waste printed circuit boards (PCBs). Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 32, 90–104.

[41] L. Alvarado-Hernández; A.R. Alonso; G.T. Lapidus; “Recuperación de plomo a partir de materiales de desecho provenientes de análisis de materiales por vía seca”.

[52] Dirección electrónica: <http://quimica-explicada.blogspot.mx/2010/08/agua-regia.html>

[53] Castellanos N., “LA CHATARRA ELECTRÓNICA, LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL Y SU EFECTO ECONÓMICO”, presentado en el XVI Forum de Ciencia y Técnica en la Habana, Cuba 2005,

[54] Wong, C. S.C., Wu, S.C., Duzgoren-Aydin, N. S., Aydin, A. y Wong, M. H. (2007). “Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China” [Contaminación por metal traza en sedimentos de una aldea china donde se procesan residuos electrónicos], *Environmental Pollution*, 145: 434-42.

[55] Yu, X.Z., Gao, Y., Wu, S.C., Zhang, H.B., Cheung, K.C. y Wong, M.H. (2006). “Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils at Guiyu area of China, affected by recycling of electronic waste using primitive technologies” [La presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el suelo de la aldea de Guiyu, en China, donde se reciclan residuos electrónicos con tecnologías primitivas], *Chemosphere*, 65: 1500-9.

[56] Wong, C. S.C., Wu, S.C., Duzgoren-Aydin, N. S., Aydin, A. y Wong, M. H. (2007). “Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China” [Contaminación por metal traza en sedimentos de una aldea china donde se procesan residuos electrónicos], *Environmental pollutionn*, 145: 434-42.

[57] Ogunniyi, I.O., Vermaak, M.K.G., 2009. Investigation of froth flotation for beneficiation of printed circuit board comminution fines. *Miner. Eng.* 22, 378–385.

[58] Park, Y.J., Fray, D.J., 2009. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *J. Hazard. Mater.* 164, 1152–1158.