



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO A PARTIR  
DE LOS MATERIALES MULTICAPAS DE LOS ENVASES TETRA BRIK,  
MEDIANTE ATAQUE REDOX A NIVEL LABORATORIO**

**Ronald Arturo Mendizábal Alegría**

Asesorado por el Ing. Adrián Antonio Soberanis Ibáñez

Guatemala, junio de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO A PARTIR  
DE LOS MATERIALES MULTICAPAS DE LOS ENVASES TETRA BRIK,  
MEDIANTE ATAQUE REDOX A NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**RONALD ARTURO MENDIZÁBAL ALEGRÍA**  
ASESORADO POR EL ING. ADRIÁN ANTONIO SOBERANIS IBÁÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JUNIO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO A PARTIR DE LOS MATERIALES MULTICAPAS DE LOS ENVASES TETRA BRIK, MEDIANTE ATAQUE REDOX A NIVEL LABORATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 20 de noviembre de 2014.

**Ronald Arturo Mendizábal Alegría**



Guatemala, 22 de abril de 2016

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
Director de la Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Por este medio me dirijo a usted para saludarle deseándole éxitos en sus actividades y al mismo tiempo informarle que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO A PARTIR DE LOS MATERIALES MULTICAPAS DE LOS ENVASES TETRA BRIK, MEDIANTE ATAQUE REDOX A NIVEL LABORATORIO”**, el cual se llevó a cabo por el estudiante de Ingeniería Química: **Ronald Arturo Mendizábal Alegría**, identificado con el carné No. **201114597**.

Considerando que dicho documento cumple satisfactoriamente con los requisitos exigidos, solicito sirva darle continuidad al proceso para su aprobación.

Agradeciendo su atención, me suscribo atentamente,

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

Adrian Soberanis  
Ingeniero Químico  
Colegiado 1515

Ing. Adrián Antonio Soberanis Ibáñez  
Colegiado No.1515  
Asesor de Trabajo de Graduación



Guatemala, 04 de mayo de 2016.  
Ref. EIQ.TG-IF.025.2016.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **091-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Ronald Arturo Mendizábal Alegría**.  
Identificado con número de carné: **2011-14597**  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

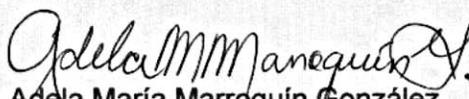
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO A PARTIR DE LOS MATERIALES MULTICAPAS DE LOS ENVASES TETRA BRIK, MEDIANTE ATAQUE REDOX A NIVEL LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Adrian Antonio Soberanis Ibañez**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Inga. Adela María Marroquín González  
COORDINADORA DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.038.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **RONALD ARTURO MENDIZÁBAL ALEGRÍA** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO A PARTIR DE LOS MATERIALES MULTICAPAS DE LOS ENVASES TETRA BRIK, MEDIANTE ATAQUE REDOX A NIVEL LABORATORIO"**.  
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, junio 2016

Cc: Archivo  
CSWD/ale

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.297-2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN MECÁNICA DEL ALUMINIO A PARTIR DE LOS MATERIALES MULTICAPAS DE LOS ENVASES TETRA BRIK, MEDIANTE ATAQUE REDOX A NIVEL LABORATORIO**, presentado por el estudiante universitario: **Ronald Arturo Mendizábal Alegría**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, junio de 2016

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por permitirme culminar esta meta y por todas las bendiciones que siempre me da.
- Mis padres** Ronald Mendizábal y Magali Alegría, por apoyarme a lo largo de la carrera, brindarme todo su apoyo y siempre confiar en mí.
- Mis abuelos** Alicia Mirtala Girón y Oscar Arturo Mendizábal, por siempre estar pendientes a lo largo de mi vida y de esta experiencia universitaria.
- Mi hermana** Ana Mercedes Mendizábal, por estar al tanto en cada momento y darme consejos para superar este reto.
- Mis tíos** Oscar y Mynor Mendizábal, por ser una motivación en mi vida y estar siempre pendientes de mí.
- Mis amigos** Francisco Mendizábal, Antonio Morales, Allan Ponce, Lourdes Castro, Leonel Samayoa, Diego Velásquez y Fernando Paredes, por darme su apoyo en toda mi vida y por todas las experiencias que vivimos juntos.

**Ana Gabriela Gálvez**

Por estar siempre a mi lado y ayudarme en toda la carrera y mostrarme su mejor lado junto a mí.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser la institución que me brindó los estudios, experiencias y conocimientos para formarme como un profesional que puede contribuir con el desarrollo de Guatemala.

**Facultad de Ingeniería**

Por ser el centro de enseñanza que inculcó en mí, la responsabilidad, el trabajo y la dedicación. Por ser mi segundo hogar y haberme formado dentro de sus aulas con conocimientos, experiencias y por crear en mí, la pasión por carrera.

**Asesor Ing. Adrián  
Soberanis**

Por el tiempo dedicado, sus consejos y las experiencias enseñadas para culminar mi formación profesional.

**Laboratorio de  
Química, Escuela  
de Ingeniería Química**

Por darme su apoyo y brindarme sus instalaciones para realizar la parte experimental de este trabajo de investigación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis .....	XVI
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Justificación .....	2
1.2. Determinación del problema.....	3
1.2.1. Definición.....	3
1.2.2. Delimitación .....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. La regla de las 3 erres .....	5
2.2. Envases <i>tetrabrik</i> .....	7
2.3. Aspectos tecnológicos de los envases <i>tetrabrik</i> .....	7
2.4. Las 6 barreras de protección del envase.....	8
2.5. Papel <i>kraft</i> (celulosa).....	10
2.6. Polietileno .....	10
2.7. Aluminio.....	11
2.8. Fabricación del <i>tetrabrik</i> .....	11
2.9. Productos que usan empaque <i>tetrabrik</i> .....	12
2.10. Ácido acético .....	12

2.11.	Equilibrio iónico ácido acético .....	13
2.12.	Polímero .....	15
2.13.	Polímeros sintéticos .....	16
2.14.	Polietileno de baja densidad .....	16
2.15.	¿Por qué se separa el aluminio del polietileno? .....	17
2.16.	Reacciones redox .....	17
2.17.	Reacción del aluminio con el ácido acético .....	19
2.18.	Ecuación de Nernst y constante de equilibrio .....	20
2.19.	Magnitud de las constantes de equilibrio .....	21
2.20.	Diagrama de Sillen .....	22
2.21.	Disociación del ácido acético .....	22
3.	METODOLOGÍA .....	25
3.1.	Variables .....	25
3.1.1.	Variables de operación.....	25
3.1.1.1.	Temperatura.....	25
3.1.1.2.	Presión .....	26
3.1.1.3.	Potencial de hidrógeno (pH).....	26
3.1.1.4.	Concentraciones reales de las soluciones .....	28
3.1.2.	Variables del proceso .....	28
3.1.2.1.	Concentración .....	29
3.1.2.2.	Volumen de los reactivos .....	29
3.1.2.3.	Reactivos.....	29
3.2.	Delimitación de campo de estudio .....	29
3.2.1.	Industria.....	30
3.2.2.	Proceso .....	30
3.2.3.	Etapas que conforman la investigación .....	30
3.2.4.	Ubicación del desarrollo de la investigación.....	30

3.3.	Recursos humanos.....	30
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	31
3.4.1.	Equipo .....	31
3.4.2.	Cristalería .....	31
3.4.3.	Reactivos y materia prima .....	32
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa .....	32
3.5.1.	Técnica cualitativa .....	33
3.5.2.	Técnica cuantitativa .....	33
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	33
3.6.1.	Preparación de los envases <i>tetrabrik</i> .....	33
3.6.1.1.	Obtención .....	33
3.6.1.2.	Limpieza del envase .....	34
3.6.1.3.	Forma del envase .....	34
3.6.2.	Preparación de la solución de ácido acético.....	34
3.6.2.1.	Soluciones .....	34
3.6.3.	Separación mecánica de los pliegos .....	35
3.6.4.	Procedimiento para la separación mecánica del aluminio del polietileno mediante la inmersión en ácido acético.....	35
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	37
3.7.1.	Tabulación de los tiempos que tarda las soluciones por individual en separar el polietileno del aluminio.....	37
3.7.2.	Gastos en la preparación de cada solución de ácido acético.....	38
3.7.3.	Relación de cuánto se gasta en preparar las soluciones en comparación a cuántos días se tarda en la separación .....	38

3.8.	Análisis estadístico.....	39
3.8.1.	Medidas de tendencia central.....	39
3.8.1.1.	Media aritmética.....	39
3.8.2.	Medidas de dispersión .....	40
3.8.2.1.	Desviación estándar .....	40
3.8.2.2.	Varianza .....	40
3.8.2.3.	Análisis de varianza (Anova) .....	41
3.9.	Plan de análisis de los resultados .....	42
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables .....	42
3.9.2.	Programas a utilizar para el análisis de datos .....	43
4.	RESULTADOS.....	45
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	51
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES .....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59
	APÉNDICES.....	63
	ANEXOS.....	79

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Capas de los envases <i>tetrabrik</i> .....	9
2.	Molécula de ácido acético .....	13
3.	Molécula del polietileno .....	16
4.	Parte del pliego donde se da la reacción redox .....	17
5.	pH contra concentración $[H^+]$ .....	27
6.	Procedimiento .....	36
7.	Relación tiempo contra concentración .....	46
8.	Relación tiempo <i>versus</i> gasto .....	48
9.	Relación tiempo contra pH .....	48
10.	Diagrama de Ishikawa.....	74

### TABLAS

I.	pH's teóricos de las soluciones.....	27
II.	Descripción de pH contra concentración $[H^+]$ .....	27
III.	Concentraciones reales de las soluciones .....	28
IV.	Concentraciones del ácido acético glacial.....	29
V.	Equipo .....	31
VI.	Cristalería.....	32
VII.	Reactivos y materia prima.....	32
VIII.	Soluciones de ácido acético glacial.....	34
IX.	Tiempo de separación.....	37
X.	Gastos de preparación .....	38

XI.	Relación gasto–tiempo .....	39
XII.	Tabla resumen análisis Anova y grados de libertad.....	42
XIII.	Tiempo de separación .....	45
XIV.	Descripción de la relación tiempo contra concentración .....	46
XV.	Punto de inflexión tiempo <i>versus</i> concentración.....	46
XVI.	Gastos de preparación.....	47
XVII.	Relación gasto–tiempo .....	47
XVIII.	Descripción de la relación tiempo <i>versus</i> gasto.....	48
XIX.	Descripción de la relación tiempo contra pH.....	49
XX.	Análisis de varianza .....	49
XXI.	Análisis de varianza de un factor .....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\text{CH}_3\text{-COOH}$	Ácido acético
Al	Aluminio
LDPE	Aluminio de baja densidad
atm	Atmósferas
Ca	Concentración del ácido
M	Concentración molar
Ka	Constante de disociación
K	Constante de equilibrio
F	Constante de Faraday
R	Constante de gases ideales
$X_i$	Dato Inicial
$\sigma$	Desviación estándar
$e^-$	Electrones
(ac)	Estado acuoso
(g)	Estado gaseoso
(s)	Estado sólido
$^\circ\text{C}$	Grado centígrado
$\alpha$	Grado de disociación
$\text{H}_2$	Hidrógeno
$\text{H}^+$	Hidronios
$\text{CH}_3\text{-COO}^-$	Ion acetato
$\text{H}^+$	Iones hidronio
$\bar{x}$	Media aritmética

<b>mL</b>	Mililitros
<b>N</b>	Número de datos
<b>n</b>	Número de electrones cedidos
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>E°</b>	Potencial estándar de reducción
<b>T</b>	Temperatura

## GLOSARIO

<b>Ácido acético</b>	El ácido acético, ácido metilcarboxílico o ácido etanoico, se puede encontrar en forma de ion acetato. Este es un ácido que se encuentra en el vinagre, siendo el principal responsable de su sabor y olor agrios.
<b>Ácido débil</b>	Un ácido débil es aquel ácido que no está totalmente disociado en una disolución acuosa. Aporta iones hidronio al medio, pero también es capaz de aceptarlos.
<b>Agente oxidante</b>	Un agente reductor es aquel que gana electrones a un agente reductor. Existe una reacción química conocida como reacción de reducción-oxidación, en la que se da una transferencia de electrones.
<b>Agente reductor</b>	Un agente oxidante es aquel que cede electrones a un agente oxidante. Existe una reacción química conocida como reacción de reducción-oxidación, en la que se da una transferencia de electrones.
<b>Biodegradable</b>	Que puede descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de agentes biológicos, como el sol, el agua, las bacterias, las plantas o los animales.

<b>Celulosa</b>	Sustancia blanca, amorfa, inodora y sin sabor, usada en la producción de papel. La celulosa o fibra es el elemento constitutivo de la madera. Desde el punto de vista químico, la celulosa es un polímero natural formado por unidades de glucosa.
<b>Estanco</b>	Acción que permite que nada pueda pasar a través del empaque y ayude a mantener el líquido dentro del mismo.
<b>Grado de disociación</b>	Porcentaje de ácido acético que se separa en ion acetato al ser mezclado en solución acuosa.
<b>Hidrocarburos</b>	Compuesto de tipo orgánico que surge al combinar átomos de hidrógeno con otros de carbono. Según los expertos en la materia, en este compuesto la forma molecular se basa en átomos de carbono enlazados con átomos de hidrógeno.
<b>Inmersión</b>	Introducción completa de un cuerpo en un líquido, cubriendo todos los espacios de este.
<b>LDPE</b>	<i>Low Density Polyethylene</i> o bien en español polietileno de baja densidad.
<b>pH</b>	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio presentes en determinadas disoluciones.

<b>Pirólisis</b>	Es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.
<b>Polietileno</b>	Químicamente es el polímetro más simple. Este polímero puede ser producido por diferentes reacciones de polimerización, polímero preparado a partir de etileno. Es un polímero de cadena lineal no ramificada.
<b>Probiótico</b>	Son alimentos con microorganismos vivos adicionados que permanecen activos en el intestino y ejercen importantes efectos fisiológicos. Ingeridos en cantidades suficientes, pueden tener efectos beneficiosos, como contribuir al equilibrio de la microbiota intestinal del huésped y potenciar el sistema inmune.
<b>PVC</b>	Es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo. Es el derivado del plástico más versátil. Este se puede producir mediante cuatro procesos diferentes: suspensión, emulsión, masa y solución.
<b>Reacción redox</b>	Reducción-oxidación de óxido-reducción o simplemente, reacción redox, a toda reacción química en la que uno o más electrones se

transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación.

**Separación mecánica** Método de separación de láminas mediante fricción por medio de las manos para retirar las capas de los envases.

***Tetrabrik*** Envase de cartón producido por la empresa sueca Tetrapak. Tiene forma de paralelepípedo y está compuesto por diferentes capas. Este es el más conocido y el más vendido del portafolio de los envases de Tetrapak.

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo separar el aluminio contenido en los pliegues LDPE-AI-LDPE de los envases de *tetrabrik* por medio de soluciones de ácido acético, dejando reposar las láminas un determinado tiempo y luego separándolas mecánicamente.

Los envases pasaron por un previo lavado para retirar los residuos contenidos, luego se cortaron cinco pliegos de dimensiones establecidas, estos pliegos se introdujeron en agua a 20 °C y se agitaron para retirar los residuos de celulosa y obtener el polietileno junto con el aluminio. Se prepararon cinco soluciones de ácido acético a distintas concentraciones, luego los pliegos de polietileno junto con el aluminio se introdujeron en las distintas soluciones y se dejaron reposar los días necesarios para que reaccionaran, en estos días se fue a monitorear constantemente los pliegos para observar si algunos ya presentaba burbujas de hidrógeno, realizando este mismo procedimiento para las cuatro soluciones restantes; si presentaban burbujas de hidrógeno eso indicaba que ya se podían separar mecánicamente y se procedía con esta acción.

Mediante la experimentación se determinó que la solución 2,99 M es la concentración mínima para lograr separar las láminas está mostrando un tiempo mínimo de separación de 14 horas. Mediante el análisis estadístico se comprueba que existe diferencia significativa entre los datos y se determina que el tiempo de inmersión es inversamente proporcional a la concentración de ácido acético.



## OBJETIVOS

### General

Evaluar el tiempo de inmersión mínimo para la separación mecánica de las láminas aluminio–polietileno -LDPE/Al/LDPE- mediante la inmersión en soluciones acuosas de ácido acético, variando concentraciones, para el ataque redox.

### Específicos

1. Determinar la concentración mínima de ácido acético para la separación mecánica del aluminio en las láminas LDPE/Al/LDPE con base en los tiempos de inmersión.
2. Determinar el tiempo mínimo de inmersión para la separación del aluminio en las láminas LDPE/Al/LDPE con base en las diferentes concentraciones de ácido acético.
3. Evaluar si existe una diferencia significativa mediante un análisis estadístico de varianza, entre los diferentes tiempos de separación en función de la concentración de ácido acético.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis de trabajo o científica**

A los envases de tetrabrik es posible separarles el aluminio que estos contienen mediante la inmersión en ácido acético a una concentración determinada en un periodo tiempo, al variar la concentración del ácido el tiempo de inmersión varía, con esto se podrá obtener el tiempo óptimo y la concentración óptima que requiere el envase *tetrabrik* para lograr la separación.

### **Hipótesis estadística**

#### **Hipótesis alterna**

$H_a$ : la variación de las concentraciones en la solución representarán un cambio significativo en los tiempos para que el aluminio se separe del polietileno.

#### **Hipótesis nula**

$H_0$ : la variación de las concentraciones en la solución no representarán un cambio significativo en los tiempos para que el aluminio se separe del polietileno.

## INTRODUCCIÓN

Determinar un punto óptimo en el cual el aluminio se separe del polietileno que está contenido en los envases de *tetrabrik* a partir del ácido acético, es el objetivo de la presente investigación; considerando que el aluminio es un metal muy usado en la industria y en estos envases es de suma importancia, pero en el mundo son muy pocas las empresas que se dedican a separarlo, debido a que es de gran trabajo realizar este proceso y además muy costoso.

La ventaja de poder extraer este aluminio presente en estos envases es el reciclado y la preservación del medio ambiente, que es lo primordial en estos días, asimismo el papel de estos envases, por lo que se recicla dos de tres componentes claves en estos envases.

El aluminio recuperado puede ser reutilizado para elaborar nuevos envases tipo *pack* al igual que el papel recuperado, si este fuera el caso, el polietileno sería desechado, pero existe otro método donde solo se recicla el papel, pero el polietileno queda unido aún al aluminio y se realizan laminas prensadas con calor y al igual que solo las láminas de aluminio estas son igual de resistentes. Teniendo en cuenta esto se puede aprovechar en un 100 % este envase, ya sea para su uso primordial o para obtener beneficios con su reciclaje.

El método que se utilizará para separar el aluminio no es el empleando en la industria debido al alto costo que provoca el ácido acético, en la industria el método más conocido es por pirólisis con plasma debido a su alta temperatura; introducen el polietileno junto con el aluminio y las altas temperaturas vaporizan

el polietileno, mientras que el aluminio pasa a un estado líquido y se obtiene así, bloques de aluminio puro.

## 1. ANTECEDENTES

Una de las formas más habituales de envasar productos, en particular alimenticios, es el empleo de envases de tipo *pack*. Este tipo de envases se elabora a partir de un material compuesto por láminas de materiales celulósicos, aluminio y polímeros; generalmente polietileno de baja densidad. Este material, por sus características de higiene e impermeabilidad, es muy adecuado para fabricar envases destinados a contener productos alimenticios.

Se han desarrollado distintos métodos para intentar recuperar y aprovechar todos o alguno de dichos materiales. Así, se conoce un método para recuperar el material celulósico contenido en residuos de envases de tipo *pack*: que comprende el tratamiento de dichos residuos con agua caliente, con lo que el cartón del envase se reblandece y se obtiene una mezcla de fibras de celulosa que se pueden separar del baño de agua, recuperar y reutilizar. Un método habitual para recuperar aluminio comprende el tratamiento térmico del residuo, aunque este método ocasiona la descomposición del material polimérico y la generación de gases que deben ser tratados o reciclados para su combustión.

El 29 de octubre de 1998, se realizó una patente en la cual se establece un método para la recuperación de aluminio, celulosa y polietileno a partir de residuos de envases de tipo *pack*, en el cual utilizaban ácido acético a una concentración constante y lo dejaban un tiempo constante, esta patente no toma en cuenta el gasto producido con el ácido acético, y por esto se toma la iniciativa de hacer variaciones en las concentraciones para lograr un punto óptimo de separación del aluminio.

Existen otros métodos de separación, como se hace en otra patente llamada procedimiento para recuperar polietileno y aluminio de hojas de aluminio recubiertas de polietileno de residuos de envases tipo “*pack*”, en la cual utilizan disolventes orgánicos “hidrocarburos”, además emplean el calentamiento de las soluciones, por lo que se tiene un gasto de reactivos y de energía que no beneficia en los gastos del proceso, por esto se toma un reactivo que no disuelva el plástico, sino que solo lo separe, de modo que no se tengan que realizar procedimientos posteriores para separar el solvente del polietileno y del aluminio.

### **1.1. Justificación**

Guatemala, no es un país que tenga la costumbre de reciclar, por lo que este trabajo, no solo es una buena forma de ayudar al medio ambiente, sino también a concientizar a la gente a que recicle estos envases *tetrabrik*.

El aluminio es un recurso no renovable, por lo que cada vez se hace más difícil y más costosa su obtención, pero esto se puede eliminar con el reciclaje, sin embargo, este proceso tiene un costo, pero vale la pena debido al impacto que tendrá en el medio ambiente.

En este proyecto no se tiene únicamente como beneficiario la empresa que realiza la separación y vende el aluminio y el papel reciclado; estos envases llegar a esta empresa y para esto se crean instituciones encargadas de recolectar los y a su vez se crean más empleos y lo cual contribuye al problema del desempleo que sufre Guatemala. A raíz de esto se benefician las empresas que compran de nuevo el aluminio y el papel reciclado a un menor precio del comercial.

Se escoge este método de separación con el ácido acético, a pesar de ser el más caro en la industria, debido a que en las instalaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la Facultad de Ingeniería no se cuenta con los equipos que sean capaces de alcanzar las temperaturas para llevar a cabo el proceso de pirólisis. Además, no existen documentos en los que se realice una variación en la concentración de la solución de ácido acético para determinar el tiempo óptimo en relación a las concentraciones de la solución.

## **1.2. Determinación del problema**

El *tetrabrik* es un producto que tarda varios años en poder degradarse en el medio ambiente, por lo que se busca una manera de poder aprovechar este producto y ayudar con la reducción de la contaminación y acumulación de polietileno y aluminio, por lo que se establece un método el cual ayuda al reciclaje del polietileno y aluminio de forma separada.

### **1.2.1. Definición**

Actualmente, los envases *tetrabrik* en Guatemala son desechados a vertederos establecidos en el país, esta situación provoca el aumento de la contaminación en el ambiente, además no existe ninguna empresa especializada en Guatemala en realizar este tipo de reciclaje del aluminio. El estudio tiene como fin la separación del aluminio mediante diferentes soluciones de ácido acético a distintas concentraciones y establecer el tiempo óptimo de separación entre cada una de ellas.

### **1.2.2. Delimitación**

Los envases de *tetrabrik* serán lavados previamente para el proceso deseado, luego se cortarán en láminas de dimensiones especificadas para luego introducirlas en el ácido acético.

La reacción de la separación con una concentración de ácido acético al 6 % en peso se lleva a cabo aproximadamente en 3 días, pero como se harán variaciones en la concentración del ácido acético, no se sabe en cuántos días ya se podrá separar el aluminio del polietileno, debido a esto se harán corridas para cada concentración de ácido para obtener un resultado más preciso.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. La regla de las 3 erres

También conocida como las tres erres de la ecología o simplemente 3R, es una propuesta sobre hábitos de consumo, popularizada por la organización ecologista Greenpeace, que pretende desarrollar hábitos como el consumo responsable. Este concepto hace referencia a estrategias para el manejo de residuos que buscan ser más sustentables con el medio ambiente, y específicamente dar prioridad a la reducción en el volumen de residuos generados.

- Reducir

Al reducir el problema, se disminuye el impacto en el medio ambiente. Los problemas de concientización habría que solucionarlos, empezando por esta erre. La reducción puede realizarse en 2 niveles: reducción del consumo de bienes o de energía. De hecho, actualmente la producción de energía produce numerosos desechos (nucleares, dióxido de carbono). Los objetivos de reducir son:

- Reducir o eliminar la cantidad de materiales destinados a un uso único (por ejemplo, los embalajes).
- Adaptar los aparatos en función de sus necesidades (por ejemplo, poner lavadoras y lavavajillas llenos y no a media carga).
- Reducir pérdidas energéticas o de recursos: de agua, desconexión de aparatos eléctricos.

Ejemplo: reducir la emisión de gases contaminantes nocivos o tóxicos evitará la intoxicación animal o vegetal del entorno si llega a cotas no nocivas. Países europeos trabajan con una importante política de la reducción y con el lema: "La basura es alimento (para la tierra) producen productos sin contaminantes (100 % biodegradables), para que cuando acabe su vida útil no tenga impacto en el medio, o este sea lo más reducido posible"<sup>1</sup>.

- Reutilizar

También reduce impacto en el medio ambiente, indirectamente. Esta se basa en reutilizar un objeto para darle una segunda vida útil. Todos los materiales o bienes pueden tener más de una vida útil, bien sea reparándolos para un mismo uso o con imaginación para un uso diferente.

Ejemplos: utilizar la otra cara de las hojas impresas, rellenar botellas. Las botellas desechables se pueden convertir en ladrillos ecológicos, si en su interior se les ponen todas las bolsas de plástico que ya no se usan. Las cajitas o frascos de PVC, metal o plástico se pueden pintar o decorar y utilizarse nuevamente para guardar distintos elementos. El papel usado se puede transformar en pulpa y crear nuevas hojas para escribir.

- Reciclar

Esta es una de las erres más populares debido a que el sistema de consumo actual ha preferido usar envases de materiales reciclables (plásticos y *bricks*, sobre todo), pero no biodegradables. De esta forma se necesita el empleo en mayor forma personal y energía en el proceso.

---

<sup>1</sup> Cumbre del G8 celebrada a lo largo del mes de junio de 2004.

Ejemplo: el vidrio y la mayoría de plásticos se pueden reciclar calentándolos hasta que se funden y dándoles una nueva forma. Es como utilizar algo de su principio, aunque la eficiencia no es del cien por ciento. En el caso del vidrio en concreto, sí es completamente reciclable: de una botella se podría obtener otra.

## **2.2. Envases *tetrabrik***

Este envase se introdujo en el mercado en 1963, después de un largo proceso de desarrollo basado en el anterior envase *Tetra Classic* anterior que tenía forma de tetraedro. A pesar de la revolución que supuso el envase original, a finales de la década de 1950, Ruben Rausing y el equipo directivo de *tetrabrik* se dieron cuenta de que el envase necesitaba un diseño rectangular para continuar siendo competitivo. Después de invertir una gran cantidad de dinero en su desarrollo, en 1963 se instaló la primera máquina de envasado *tetrapak* en Motala, en el centro de Suecia. El diseño rectangular del *tetrabrik* pronto se convirtió en un éxito de ventas en Suecia y en todo el mundo, debido a su uso eficaz del espacio y los materiales y al aumento de la eficiencia en la distribución y almacenamiento. Eso allanó el camino para el éxito de *tetrabrik* durante la década de 1970, y años sucesivos.

## **2.3. Aspectos tecnológicos de los envases *tetrabrik***

Por construcción, los *tetrabrik* son embalajes ligeros y compactos que se pueden abrir sin utensilios, y permiten aislar los alimentos y conservarlos en condiciones óptimas. Se componen de capas superpuestas y pegadas entre sí, de interior a exterior:

- Una capa de aluminio

- Una capa de papel Kraft (procedente de celulosa virgen)
- Cuatro capas de plástico polietileno

Un *tetrabrik* es un envase de cartón compuesto, aproximadamente de un 75 % de fibra de celulosa, un 20 % de polietileno y un 5 % de hoja de aluminio.

Típicamente, su forma es un prisma rectangular, que en el caso de algunos productos refrigerados, está coronado con otro prisma, triangular. Existen otras formas, entre ellas una con perímetro de ocho lados y otra en forma de bolsa.

El cierre es una pieza plana de aluminio o plástico que se puede arrancar con la uña (a veces con una arandela para permitir arrancarlo con el dedo), y puede incluir un tapón de rosca que permita volver a cerrarlo (especialmente en productos refrigerados).

#### **2.4. Las 6 barreras de protección del envase**

Gracias a las seis capas o barreras de protección de los envases de *tetrabrik*, los alimentos se mantienen en óptimas condiciones durante un largo periodo de tiempo sin la necesidad de conservantes químicos ni refrigeración.

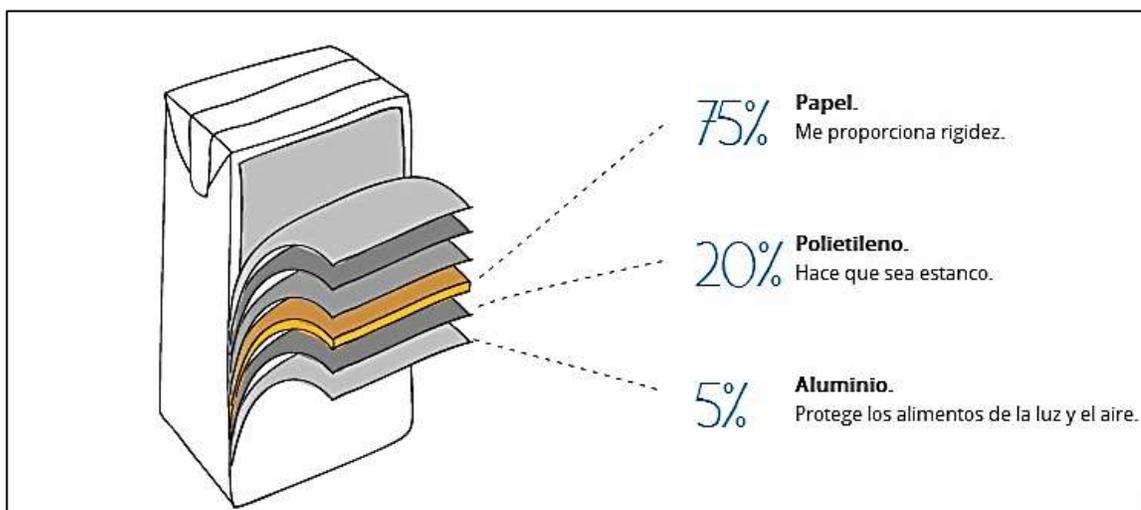
Del exterior al interior del envase las capas o barreras de protección son las siguientes:

- Primera capa: polietileno que impermeabiliza el envase y protege los alimentos de la humedad atmosférica externa.
- Segunda capa: cartón que le da forma, estabilidad y rigidez al envase y en donde se realiza la impresión del diseño.

- Tercera capa: polietileno que permite la adhesión entre el cartón y la capa de aluminio.
- Cuarta capa: aluminio que actúa como barrera contra la luz y el oxígeno, es la capa más importante del envase. Gracias a este material, los alimentos permanecen completamente protegidos del medio ambiente, se garantiza la protección de sus vitaminas y nutrientes, evitando la formación de bacterias. La capa de aluminio es el elemento que marca la diferencia en los envases de *tetrabrik*.
- Quinta capa: polietileno que optimiza la adhesión del aluminio.
- Sexta capa: polietileno que previene el contacto del producto con las otras capas del material de envase.

De esta forma ningún agente externo consigue atravesar el envase y contaminar los elementos. Además el sellado del envase se realiza por aplicación de presión y alta frecuencia, sin utilizar pegamento alguno.

Figura 1. **Capas de los envases *tetrabrik***



Fuente: TETRAPAK. *Capas de tetrapak.*

## **2.5. Papel kraft (celulosa)**

El papel de estraza, papel madera o papel *kraft*, es un tipo de papel basto y grueso de color marrón, y resistente obtenido a partir de pulpa de fibra de madera.

Para su fabricación se usa hidróxido de sodio para hacer la pulpa de fibra de madera que posteriormente será la materia prima que lo forma. Debido a la coloración que se obtiene en este proceso, generalmente se comercializa en tonos marrones. Aunque, también se puede blanquear, en ese caso se obtiene un tipo de papel más resistente a la manipulación. A continuación una explicación base de cada estilo.

El papel es la principal materia prima que se utiliza para fabricar los cartones para bebidas. Por término medio el 75 % de un envase de *tetrabrik* es papel (en peso).

El papel está fabricado con madera, una materia prima renovable, ya que proviene de bosques en continuo crecimiento.

La trazabilidad garantiza que la madera que se utiliza proviene de fuentes adecuadas y legales. Se pide a proveedores que su trazabilidad esté certificada y auditada por entidades independientes, de acuerdo con las normas de la cadena de custodia del FSC (Forest Stewardship Council).

## **2.6. Polietileno**

Por término medio, el polietileno representa el 20 % del peso del envase.

El polietileno proporciona estanqueidad al contenido líquido y mantiene unidos los diferentes materiales del envase. El uso de las capas más finas posibles de polietileno (la capa exterior tiene solo 12 micras de espesor) minimiza el empleo de recursos.

También existen acuerdos actualmente, para comenzar a probar polietileno verde vegetal (procedente de fuentes renovables), para fabricar tapones para los envases de *tetrapak*.

## **2.7. Aluminio**

Cuando se usa la hoja de aluminio solo representa un máximo del 5 % del peso del cartón para bebidas. El envase aséptico (de larga duración) necesita una barrera extremadamente eficaz contra el oxígeno. La hoja de aluminio es una solución muy práctica para esta necesidad. La hoja de aluminio permite el almacenamiento seguro a temperatura ambiente de los productos envasados, y ahorro de la energía necesaria para su refrigeración, tanto en el transporte como en el almacenamiento.

## **2.8. Fabricación del *tetrabrik***

El proceso de producción del material de envase es el siguiente:

- Impresión: el papel en blanco se recibe en grandes bobinas, y en él se imprimen los diferentes diseños. El sistema de impresión es flexo-línea o flexo-process, ambos con tintas base agua. El papel se carga al comienzo de la impresora y va pasando por los diferentes cuerpos de impresión donde, mediante un sistema de rodillos, se aplica la tinta al papel.

- Laminación: una vez que el papel está impreso se lamina, es decir, se cubre con las diferentes capas de polietileno y aluminio que dotarán al envase de impermeabilidad y barrera contra la luz y el aire, los principales enemigos de los alimentos.
- Corte: cuando las bobinas de papel están impresas y laminadas, se dividen en las diferentes pistas (del ancho de un envase), se rebobinan y paletizan para entregar al cliente.

## **2.9. Productos que usan empaque *tetrabrik***

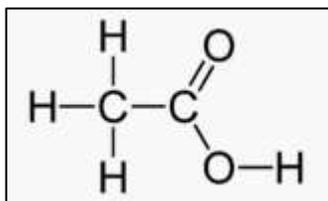
Los productos que se usan de envases *tetrabrik* son los siguientes:

- Leche: todo este tipo requiere de una pasteurización previa para mantener la vida útil del producto.
- Yogurt: todo este tipo requiere de una pasteurización previa para mantener la vida útil del producto.
- Bebidas prebióticas: bebidas como jugos naturales, al igual que los dos anteriores requiere de una pasteurización.

## **2.10. Ácido acético**

El ácido metilencarboxílico o ácido etanoico, se puede encontrar en forma de ion acetato. Este es un ácido que se encuentra en el vinagre, siendo el principal responsable de su sabor y olor agrios. Su fórmula es  $\text{CH}_3\text{-COOH}$  ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ ).

Figura 2. **Molécula de ácido acético**



Fuente: *Wikimedia*. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fd/Acetic-acid-2D-flat.png/150px-Acetic-acid-2D-flat.png>. Consulta: junio de 2016

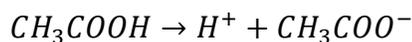
En disolución acuosa, el ácido acético puede perder el protón del grupo carboxilo para dar su base conjugada, el acetato. Su pKa es de 4,8 a 25 °C, lo cual significa, que al pH moderadamente ácido de 4,8, la mitad de sus moléculas se habrán desprendido del protón. Esto hace que sea un ácido débil.

En el siguiente trabajo se usa ácido acético glacial (ácido débil) ya que es un reactivo barato en comparación de otros y debido a su reacción de hidrolisis, este logra la separación del aluminio del polietileno. No se usa un ácido fuerte porque este puede reaccionar con el polietileno, destruyéndolo al ponerlos en contacto.

### 2.11. **Equilibrio iónico ácido acético**

El equilibrio iónico es un tipo especial de equilibrio químico, caracterizado por la presencia de especies químicas en solución acuosa, las cuales producen iones las especies que producen en solución cargas son denominadas electrolitos. Un electrolito es cualquier especie que permite la conducción de la corriente eléctrica. El equilibrio, en general, se establece con gran rapidez entre especies iónicas en solución.

Considérese el siguiente equilibrio de la disociación del ácido acético



Una constante de disociación ácida,  $K_a$ , (también conocida como constante de acidez o constante de ionización ácida) es una medida cuantitativa de la fuerza de un ácido en solución. Es la constante de equilibrio de una reacción conocida como disociación en el contexto de las reacciones ácido-base. El equilibrio puede escribirse como



Donde HA es un ácido genérico que se disocia, dividiéndose en  $A^-$ , conocida como base conjugada del ácido, y el ion hidrógeno o protón,  $H^+$ , que, en el caso de soluciones acuosas, existe como un ion hidronio solvatado.

La constante de equilibrio práctica es

$$K_a = \frac{[H^+][CH_3COO^-]}{[CH_3COOH]}$$

Debido a las muchas órdenes de magnitud que pueden abarcar los valores de  $K_a$ , en la práctica se suele expresar la constante de acidez mediante una medida logarítmica de la constante de acidez, el  $pK_a$ , que es igual al  $-\log_{10}$ , y que también suele ser denominada constante de disociación ácida

$$pK_a = -\log_{10}K_a$$

A mayor valor de pKa, la extensión de la disociación es menor. Un ácido débil tiene un valor de pKa en un rango aproximado de -2 a 12 en agua. Los ácidos con valores de pKa menores que aproximadamente -2 se dice que son ácidos fuertes; un ácido fuerte está casi completamente disociado en solución acuosa, en la medida en que la concentración del ácido no disociado es indetectable.

Para el ácido acético se tiene un  $Ka = 1,8 \times 10^{-5}$  y su  $pKa = 4,74$

## **2.12. Polímero**

Es una molécula grande, resultado de la unión de pequeñas unidades químicas simples. Por lo general, la unidad que se repite es equivalente al monómero del que se forma el polímero. Estos monómeros pueden estar colocados en cadena o en posiciones de ramificación.

Por el número de unidades repetitivas que formen el polímero se establece su longitud, al que se le llama grado de polimerización. Los polímeros poseen alto peso molecular debido a que el peso molecular de la unidad repetitiva se multiplica por su grado de polimerización, obteniendo que los polímeros utilizados comúnmente en la industria lleguen a tener un peso molecular de hasta 1 000 000. El alto peso molecular permite que las fuerzas entre los enlaces sean lo suficientemente grande que proporcionen características como la resistencia, la estabilidad y otras propiedades mecánicas.

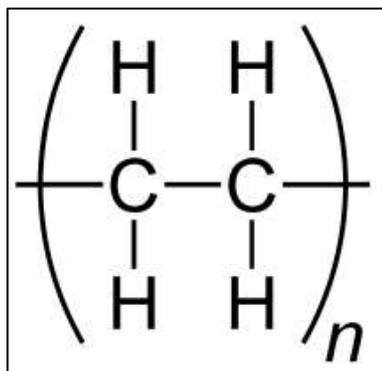
### 2.13. Polímeros sintéticos

Los polímeros sintéticos surgen de la escasez de polímeros naturales, siendo entonces los creados por el hombre en un laboratorio o en la industria. Estos son elaborados a partir de elementos propios de la naturaleza y sus características son similares a las de los polímeros naturales para que puedan cumplir la misma función. Entre los polímeros sintéticos están el *nylon*, el poliestireno, el policloruro de vinilo, el polietileno, los plásticos, entre otros.

### 2.14. Polietileno de baja densidad

Es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos, como el polipropileno y los polietilenos. Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como LDPE por sus siglas en inglés, Low Density Polyethylene.

Figura 3. Molécula del polietileno

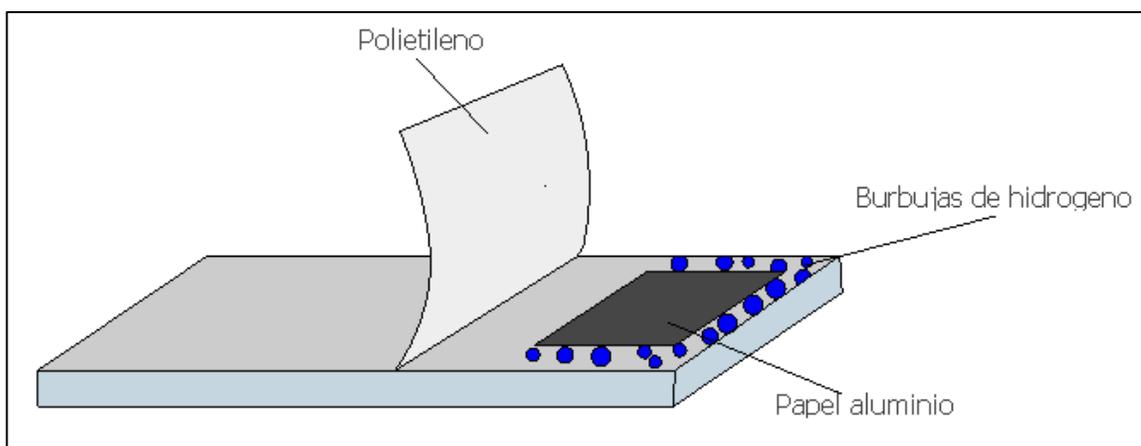


Fuente: *Blogspot*. <http://1.bp.blogspot.com/-dLaOQzXxB9c/UAP-nkLRlgl/AAAAAAAAACPM/nMYjleUeME/s1600/pe1.jpg>. Consulta: junio de 2016.

### 2.15. ¿Por qué se separa el aluminio del polietileno?

La separación del aluminio del polietileno en el experimento se da por el ataque redox del ácido al aluminio en las orillas de los pliegos de LDPE-Al-LDPE, esto debido a que los pliegos se cortan y las orillas quedan descubiertas donde el ácido entra en contacto con el aluminio y la reacción empieza en estas partes, la reacción redox produce hidrógeno molecular y oxida el aluminio en aluminio +3, este provoca el desprendimiento del polietileno en una parte de los pliegos y se procede a la separación mecánica del polietileno y aluminio en el resto del pliego.

Figura 4. **Parte del pliego donde se da la reacción redox**



Fuente: elaboración propia, empleando Adobe Illustrator.

### 2.16. Reacciones redox

Cualquier estructura de aluminio o el papel de aluminio que se tienen habitualmente en casa están oxidados en su superficie, lo que ocurre es que dicha capa de óxido no tiene un color distinto, como ocurre en el hierro y en el

cobre. No solo es indistinguible y no permite observar simple vista de la oxidación, sino que además actúa como una capa protectora del resto del metal, haciendo que la corrosión no se extienda al núcleo del mismo.

El aluminio es un metal altamente reductor. Como se observa el potencial estándar de la siguiente semirreacción

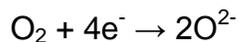


Este potencial estándar negativo para dicha reacción nos indica que la semirreacción que, realmente es termodinámicamente más favorable, es la reacción contraria, es decir, la oxidación del aluminio para formar el catión  $\text{Al}^{3+}$ . Depende, claro está, del elemento al cual se enfrente, pero en el caso del oxígeno atmosférico, la reacción redox de formación de óxido de aluminio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ocurre efectivamente, del siguiente modo:

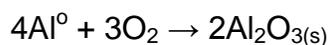
Semirreacción de oxidación



Semirreacción de reducción



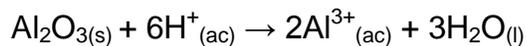
Reacción global



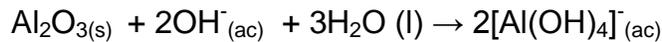
Esta capa formada de un modo natural tiene un grosor aproximado de entre 20 y 100Å, es decir, entre 0,000002 y 0,00001 milímetros. Como se observa, se trata de una capa muy fina y, además, no es inmune a todas las condiciones, a pesar de que, como se ha comentado, el óxido de aluminio formado protege el resto del metal.

El óxido de aluminio tiene un comportamiento anfótero, es decir, se comporta como un ácido frente a las bases y como una base frente a los ácidos. Así,

En medio ácido, se tiene:



En medio básico



Aunque, si las condiciones no son muy agresivas y se eliminan del entorno del metal, la capa de alúmina no tarda en regenerarse nuevamente por la presencia del oxígeno atmosférico, protegiéndolo de nuevo contra la corrosión procedente del exterior.

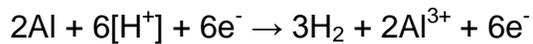
## 2.17. Reacción del aluminio con el ácido acético

La reacción de oxidación y de reducción del aluminio e hidrogeno son las siguientes

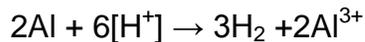




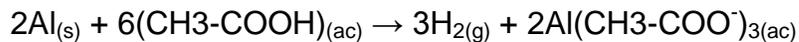
Si se igualan los electrones, hay que multiplicar la semirreacción de oxidación del aluminio por 2 y la de reducción del hidrógeno por 3.



Si se eliminan electrones



Si se añade los contra iones



## 2.18. Ecuación de Nernst y constante de equilibrio

La ecuación de Nerst se utiliza para calcular el potencial de reducción de un electrodo fuera de las condiciones estándar.

En este caso se usará la ecuación de nerst para determinar la constante de equilibrio y determinar en qué dirección se da la reacción. Esto dependerá del valor que indique la constante de equilibrio obtenida de la ecuación de nerst.

Ecuación de Nerst

$$E = E_2^0 - E_1^0 - \frac{RT}{n_1 n_2 F} \log k \quad [\text{Ec. 1}]$$

Despejando la ecuación para obtener la constante de equilibrio se tiene:

El valor del potencial de reducción se vuelve 0.

$$0 = E_2^0 - E_1^0 - \frac{RT}{n_1 n_2 F} \log k$$

El valor de  $\frac{RT}{F}$  toma un valor constante de 0,0581 a una temperatura de 20 °C a la cual estaban las soluciones.

$$k = 10^{\frac{E_2^0 - E_1^0 n_1 n_2}{0,0581}}$$

Sustituyendo valores: los potenciales de reducción estándar y los electrones cedidos se muestran en el apéndice 6, tabla IX.

$$k = 10^{\frac{1,66(6)}{0,0581}}$$
$$k = 3,8E172$$

Este valor de k es muy grande, lo que indica que al equilibrio se habrá consumido la mayor parte de los reactivos, teniendo una gran cantidad de ion, acetato e hidrógeno molecular, como se muestra en la figura 8, efectivamente se encuentran las burbujas de hidrógeno.

### 2.19. Magnitud de las constantes de equilibrio

Si K es muy grande, del orden de  $(10)^5$  o mayor, cuando se alcance el equilibrio, a partir de los reactivos iniciales, se habrá producido una conversión casi completa de los reactivos en los productos de la reacción.

Si  $K$  es muy pequeña, del orden de  $(10)^{-5}$  o menor, cuando se alcance el equilibrio, únicamente se habrá transformado en productos una fracción muy pequeña de los reactivos presentes inicialmente.

Para valores de la constante de equilibrio  $K$  comprendidos entre estos extremos, especialmente si  $0.01 < K < 100$ , los reactivos y los productos se encontrarán en el equilibrio en proporciones comparables, aunque esto depende en gran medida de la estequiometría de la reacción.

Hay que insistir en que, la constante de equilibrio da una idea de la extensión de la reacción, hasta donde avanza, pero no informa en absoluto acerca de su velocidad, es decir, lo rápido que se produce.

## 2.20. Diagrama de Sillen

Se utiliza para encontrar las concentraciones reales a partir de los pH's reales medidos en cada solución de ácido acético, además de determinar la disociación del ácido acético.

Se utiliza la ecuación mostrada a continuación para encontrar la concentración real a partir de los pH's reales.

$$pH = \frac{pKa}{2} + \frac{pCa}{2} \quad [\text{Ecu. 2}]$$

## 2.21. Disociación del ácido acético

Esta disociación muestra que porcentaje reacciona para dar ion acetato siendo este el que proporciona los iones hidronio que contribuyen en la reacción redox, la disociación del ácido dará una perspectiva de en qué concentración se

tiene la mayor cantidad de ion acetato para dar lugar a los iones hidronio y así, estos puedan iniciar el ataque redox al aluminio.

Para determinar el grado de disociación se utiliza el diagrama de sillen apéndice 9, figura 3 y la siguiente ecuación.

$$\alpha_1 = \frac{ka}{[H^+] + ka} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde la concentración de los iones hidronio se toman del pH tomado de cada solución y ka teniendo un valor de  $1,8 \times 10^{-5}$ .



## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. Variables**

Para la separación del aluminio del polietileno mediante la inmersión en ácido acético se utilizan las siguientes variables:

#### **3.1.1. Variables de operación**

Las variables de operación son: temperatura, presión, potencial de hidrógeno (pH) y concentraciones reales de las soluciones.

##### **3.1.1.1. Temperatura**

La temperatura a la que se realizará el lavado y la separación de la celulosa natural que está pegada al polietileno y al aluminio puede ser de 5 °C – 30 °C pero se trabajará a una temperatura comprendida entre 20 a 24 °C

La temperatura a la cual el ácido acético tiene que estar para que se realice la separación del polietileno del aluminio puede ser de 5 °C – 30 °C pero se trabajará a una temperatura comprendida entre 20 a 24 °C,

La temperatura a la cual se realiza la exfoliación del pliego de polietileno, junto con el aluminio es a temperatura ambiente.

### 3.1.1.2. Presión

La presión a la que se realizará el lavado y la separación de la celulosa natural que está pegada al polietileno y al aluminio será a presión atmosférica, normalmente 0,83 atm.

La presión a la cual el ácido acético tiene que estar para que se realice la separación del polietileno del aluminio será a presión atmosférica, normalmente 0,83 atm.

La presión a la cual se realiza la exfoliación del pliego de polietileno junto con el aluminio será a presión atmosférica a 0,83 atm.

Esta presión es a 1 530 msnm en la ciudad de Guatemala.

### 3.1.1.3. Potencial de hidrógeno (pH)

El pH de las soluciones se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$pH = \frac{pKa}{2} + \frac{pCa}{2} \quad [\text{Ec. 2}]$$

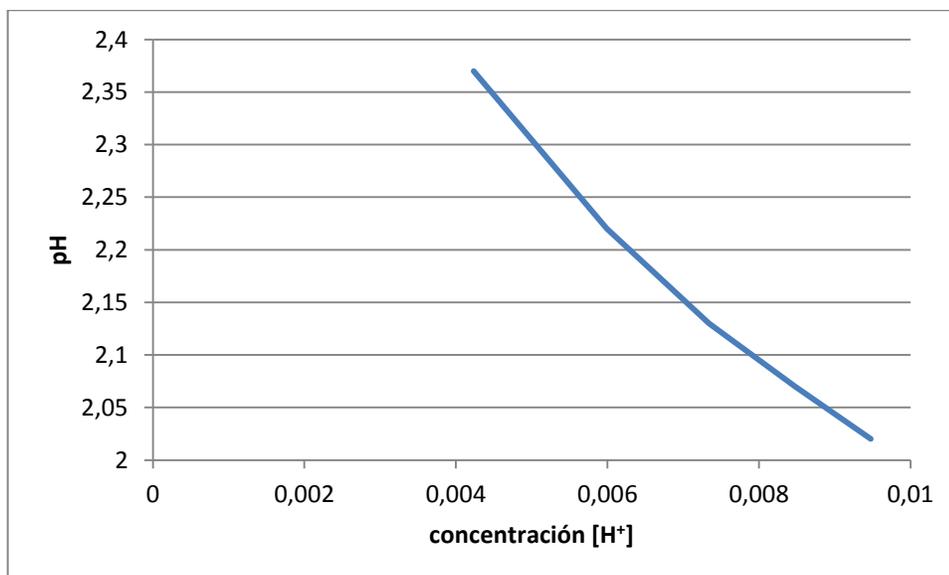
Se utiliza esta ecuación debido a que, según el diagrama de sillen, la mayor concentración de 5M muestra un pH de 2 y de acuerdo a los criterios de esta ecuación, se usa cuando los pH's están debajo de 6 o arriba de 8.

Tabla I. **pH's teóricos de las soluciones**

Solución (M)	$[H^+]$	pH
1	0,00423365	2,37
2	0,00599101	2,22
3	0,00733947	2,13
4	0,00847629	2,07
5	0,00947784	2,02

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **pH contra concentración  $[H^+]$**



Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Descripción de pH contra concentración  $[H^+]$**

Color	Modelo matemático	$R^2$	Intervalo de validez
	$pH = -66,414[H^+] + 2,6338$	0,986	$[2,02-2,37] [H^+]$

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.1.4. Concentraciones reales de las soluciones

Para calcular las concentraciones reales de las soluciones se utiliza la siguiente ecuación.

$$\left(pH - \frac{pKa}{2}\right)^2 = pCa$$

$$Ca = 10^{-\left(pH - \frac{pKa}{2}\right)^2}$$

Los resultados de las concentraciones se obtienen a partir del pH real de las soluciones.

Tabla III. **Concentraciones reales de las soluciones**

Solución	pH	Ca
1	2,46	0,69
2	2,29	1,51
3	2,20	2,29
4	2,08	3,98
5	2,01	5,49

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Variables del proceso

Las variables del proceso durante la experimentación son: concentración, volumen de los reactivos.

### **3.1.2.1. Concentración**

Las concentraciones del ácido acético glacial al 100 % al realizar la separación del polietileno del aluminio serán 5.

Tabla IV. **Concentraciones del ácido acético glacial**

Concentración	1M	2M	3M	4M	5M
---------------	----	----	----	----	----

Fuente: elaboración propia.

### **3.1.2.2. Volumen de los reactivos**

El volumen de agua a utilizar en el lavado y la separación de la celulosa natural que está pegada al polietileno y al aluminio será aproximadamente de 3 litros.

El volumen de ácido acético necesario para preparar las 5 soluciones a diferentes concentraciones es aproximadamente de 215 mL.

### **3.1.2.3. Reactivos**

El único reactivo utilizado en el proceso de la separación del aluminio del polietileno será el ácido acético glacial al 100 %, el cual hará que las capas de polietileno se hidrolicen y separe al aluminio.

## **3.2. Delimitación de campo de estudio**

Se describe la industria el proceso y etapas que conforman la investigación.

### **3.2.1. Industria**

El siguiente estudio está realizado para una futura empresa, que se dedique al reciclaje del aluminio y papel a gran escala.

### **3.2.2. Proceso**

El proceso será a escala laboratorio, cuando se tengan los resultados adecuados se pueden implementar para una escala industrial.

### **3.2.3. Etapas que conforman la investigación**

A continuación se presentan las etapas que conforman la investigación.

- Recolección de la materia prima
- Separación del polietileno del aluminio
- Encontrar tiempo óptimo de separación
- Elaboración del informe final

### **3.2.4. Ubicación del desarrollo de la investigación**

Universidad de San Carlos de Guatemala, campus central z. 12, Facultad de Ingeniería edificio T-5 Laboratorio 1 del área de Química.

## **3.3. Recursos humanos**

A continuación se presentan los recursos humanos.

- Investigador: Br. Ronald Arturo Mendizábal Alegría

- Asesor: Ing. Qco. Adrián Antonio Soberanis Ibáñez, Colegiado No. 1515

### 3.4. Recursos materiales disponibles

Los recursos materiales disponibles para la realización de la experimentación son: equipos, cristalería, reactivos y materia prima.

#### 3.4.1. Equipo

En la tabla V se muestra el equipo utilizado en la experimentación expresado en unidades:

Tabla V. **Equipo**

<b>Nombre</b>	<b>Cantidad</b>
Recipiente plástico capacidad 10 L	1 unidad
Campana de extracción	1 unidad
Guantes	1 par día
maskarilla	1 por día
Bata de laboratorio	1 unidad

Fuente: elaboración propia.

#### 3.4.2. Cristalería

La cristalería que se usa para la realización del experimento se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. **Cristalería**

<b>Nombre</b>	<b>Cantidad</b>
Termómetro	1
<i>Beacker</i> 250 mL	15
Pipeta serológica 2 mL	1
Pipeta serológica 10 mL	1
Pipeta serológica 30 mL	1
Pipeta serológica 50 mL	1
Balón aforado de 1 L	5

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.3. **Reactivos y materia prima**

Los reactivos y la materia prima usada para la realización del experimento se muestran en la tabla VII.

Tabla VII. **Reactivos y materia prima**

Reactivos y materia prima	cantidad
Envases <i>tetrabrik</i>	7
Ácido acético	1 galón
Agua destilada	1 garrafón

Fuente: elaboración propia.

### 3.5. **Técnica cualitativa o cuantitativa**

Las técnicas que se utilizarán para obtener los datos del experimento son dos: cualitativa y técnica cuantitativa, estas se detallan a continuación:

### **3.5.1. Técnica cualitativa**

Se observarán los cambios que se produzcan en la solución acuosa de ácido acético, ya sea cambio de color o en la temperatura, así como la facilidad con la que se puede separar el polietileno del aluminio.

### **3.5.2. Técnica cuantitativa**

Con base en la cantidad de días que se tarde cada solución de ácido acético en solubilizar el pegamento del polietileno para que se separe el aluminio, se determinará el tiempo óptimo de separación, con esto se podrá predecir la concentración exacta en molaridad que tendrá que llevar dichas soluciones para lograr este tiempo óptimo.

## **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

La recolección y ordenamiento de datos se hará de la siguiente manera.

### **3.6.1. Preparación de los envases *tetrabrik***

Los envases de *tetrabrik* es la materia prima que se utilizará para hacer la separación mediante el ácido acético.

#### **3.6.1.1. Obtención**

Los envases se recolectarán cuando ya estén usados y tendrán que ser de una misma marca para que no existan variaciones.

### 3.6.1.2. Limpieza del envase

Los envases serán lavados 3 veces con agua y jabón neutro, enjuagando constantemente.

### 3.6.1.3. Forma del envase

Los envases serán cortados por un lado de manera que quedan extendidos, luego se cortarán en pliegos de 10x10 cm.

## 3.6.2. Preparación de la solución de ácido acético

El ácido acético es el reactivo principal con el cual se podrá llevar a cabo la separación del aluminio del polietileno.

### 3.6.2.1. Soluciones

Se prepararán 5 soluciones de 250 mL cada una a 5 concentraciones diferentes a 1M, 2M, 3M, 4M y 5M.

Tabla VIII. **Soluciones de ácido acético glacial**

Solución	pH	Volumen de ácido acético (mL)	Volumen de agua (mL)	Volumen de balón aforado (mL)
1 M	2,46	14,29	235,69	250
2 M	2,22	28,59	221,38	250
3 M	2,13	42,89	207,11	250
4 M	2,09	57,19	192,81	250
5 M	2,02	71,48	178,45	250

Fuente: elaboración propia.

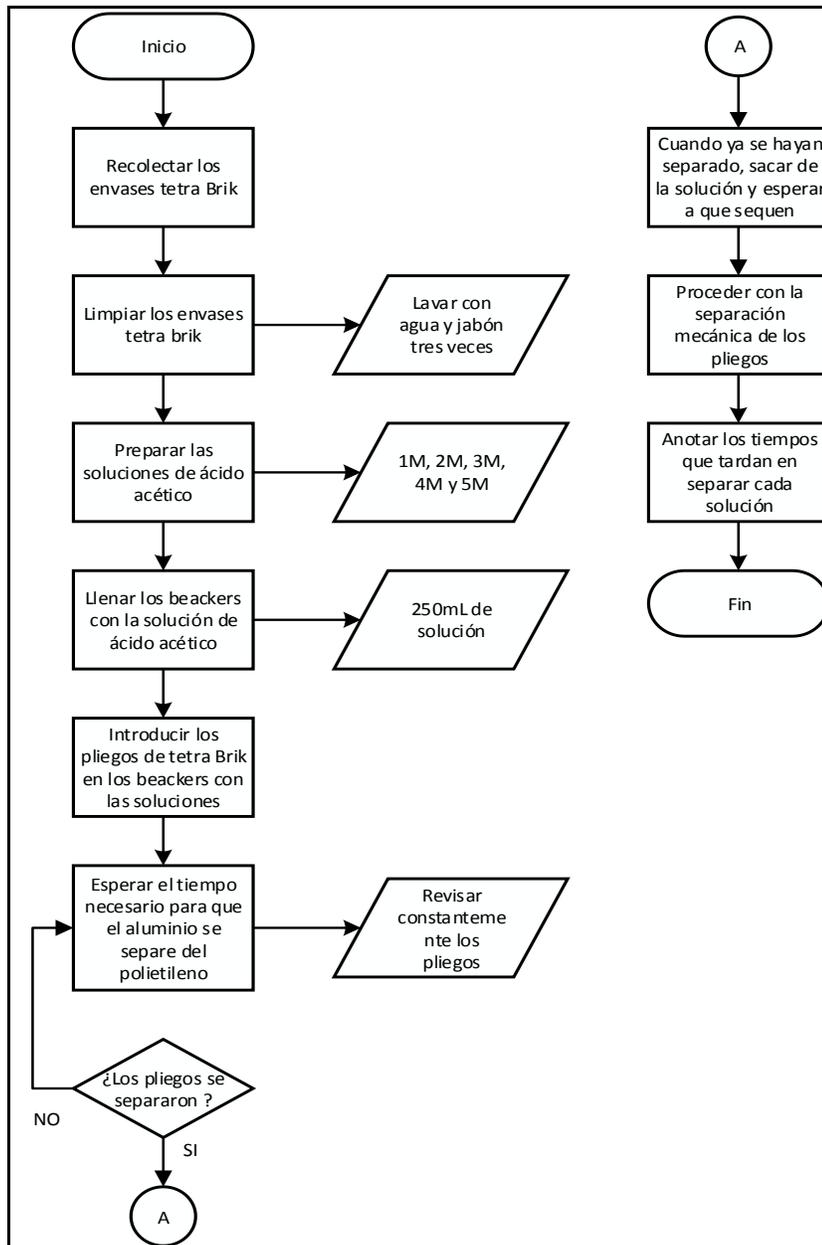
### **3.6.3. Separación mecánica de los pliegos**

La separación mecánica se realiza cuando los pliegos ya están secos, se utiliza guantes por seguridad, se toma el pliego y de la esquina se toma el polietileno con una mano y el aluminio con otra y se jalan hasta que estén completamente separadas.

### **3.6.4. Procedimiento para la separación mecánica del aluminio del polietileno mediante la inmersión en ácido acético**

A continuación se detalla el procedimiento para separar mecánicamente el aluminio del polietileno mediante la inmersión en ácido acético.

Figura 6. Procedimiento



Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se tomarán datos para establecer el tiempo óptimo de separación del aluminio del polietileno, para lograr esto se tomarán los tiempos en que se tarda cada solución de ácido acético a diferentes concentraciones, por individual, para separar de manera eficaz cada pliego de los envases de *tetrabrik*.

#### 3.7.1. Tabulación de los tiempos que tarda las soluciones por individual en separar el polietileno del aluminio

A continuación se muestran las tablas que se usarán para la tabulación de los datos del experimento realizado.

Tabla IX. **Tiempo de separación**

Solución	Concentración (M)	Tiempo (días)	Observaciones
1	1		
2	2		
3	3		
4	4		
5	5		

Fuente: elaboración propia.

### **3.7.2. Gastos en la preparación de cada solución de ácido acético**

En la tabla X se presentan los gastos de cada una de las soluciones con distintas concentraciones de ácido acético.

Tabla X. **Gastos de preparación**

Solución	Concentración (M)	Gastos (Q)
1	1	
2	2	
3	3	
4	4	
5	5	

Fuente: elaboración propia.

### **3.7.3. Relación de cuánto se gasta en preparar las soluciones en comparación a cuántos días se tarda en la separación**

En la tabla XI se presentan los datos obtenidos de la relación de gasto en preparar cada una de las soluciones y el tiempo que toma en separar cada una de las soluciones el polietileno del aluminio.

Tabla XI. **Relación gasto–tiempo**

Solución	Concentración (M)	Gastos (Q)	Tiempo (días)
1	1		
2	2		
3	3		
4	4		
5	5		

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. **Análisis estadístico**

A continuación se muestran las medidas de tendencia central y las medidas de dispersión que se usarán para realizar el análisis estadístico a los datos obtenidos mediante la experimentación.

#### 3.8.1. **Medidas de tendencia central**

La media aritmética es la única medida de tendencia central usada para realizar el análisis estadístico.

##### 3.8.1.1. **Media aritmética**

Es un conjunto de valores La media aritmética de un conjunto de valores  $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$  de una variable  $x$  viene determinada por la suma de dichos valores, dividida por el número de la muestra ( $n$ ), representada matemáticamente de la siguiente forma.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

### **3.8.2. Medidas de dispersión**

Para observar la variación de los datos que se presentan en el experimento se calculará la desviación estándar y la varianza. La desviación estándar será la que indique sobre la media de distancias que tienen los datos respecto a la media aritmética. La varianza será la media del cuadrado de las desviaciones respecto a la media aritmética, estableciendo la variabilidad de los resultados.

#### **3.8.2.1. Desviación estándar**

Es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación.

$$s = \sqrt{s^2} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

#### **3.8.2.2. Varianza**

Es la media de las desviaciones ( $x$ ) al cuadrado respecto a la media aritmética ( $x_p$ ) de una distribución estadística

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

### 3.8.2.3. Análisis de varianza (Anova)

Se utilizó el análisis de varianza para realizar una comparación entre las variables medidas, que le diera al investigador un criterio de análisis los resultados obtenidos, así como para aceptar o rechazar las hipótesis planteadas.

El criterio de Fisher se realizó con un intervalo de confianza del noventa y cinco por ciento, y debido a que el número de repeticiones por tratamiento fueron cuatro, la suma de todos los grupos fue de doce, lo que dio como resultado que los grados de libertad sean nueve al aplicar el criterio de Fisher, asimismo, en el caso de los tratamientos fueron tres, por lo que los grados de libertad fueron dos. Para aceptar o rechazar una hipótesis se basa en el criterio que el valor numérico de la prueba de Fisher debe ser menor o igual al valor numérico de la prueba de Fisher dada en tablas o crítica ( $F \leq F_T$ ).

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{T_r^2}{nk} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

$$SSA = \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n} - \frac{T_r^2}{nk} \quad [\text{Ecuación 8}]$$

$$SSE = SST - SSA \quad [\text{Ecuación 9}]$$

Tabla XII. **Tabla resumen análisis Anova y grados de libertad**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada
Entre muestras	SSA	k-1	$s_1^2 = \frac{SSA}{k-1}$ (19)	$F = \frac{s_1^2}{s^2}$ (21)
Dentro de muestras	SSE	n(k-1)	$s^2 = \frac{SSE}{n(k-1)}$ (20)	
Total	SST	nk-1		$F_C = F_{k-1, n-k}$ (22)

Fuente: Fiusac, Área de Estadística, Universidad de San Carlos de Guatemala.

### 3.9. Plan de análisis de los resultados

Los resultados por obtener serán analizados mediante el método objetivo, el cual solo es requerido observar los hechos reales y rechaza todo aquello que es de carácter subjetivo, para analizar y concluir objetivamente.

#### 3.9.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

Los métodos y modelos que se usan para cada variable usada en la realización de la experimentación se describen a continuación.

- Temperatura constante (ambiente)
- Presión constante (SNDM)
- Concentraciones (1M, 2M, 3M, 4M y 5M)
- Tiempo (días)
- Volumen (250 mL)

### **3.9.2. Programas a utilizar para el análisis de datos**

Los programas que se utilizan para el manejo adecuado de los datos obtenidos de la experimentación son los siguientes:

- Microsoft Word: crear y editar documentos profesionales
- Microsoft Excel: procesar, graficar y analizar información
- Microsoft PowerPoint: crear y editar presentaciones
- Microsoft Visio: realizar diagramas



## 4. RESULTADOS

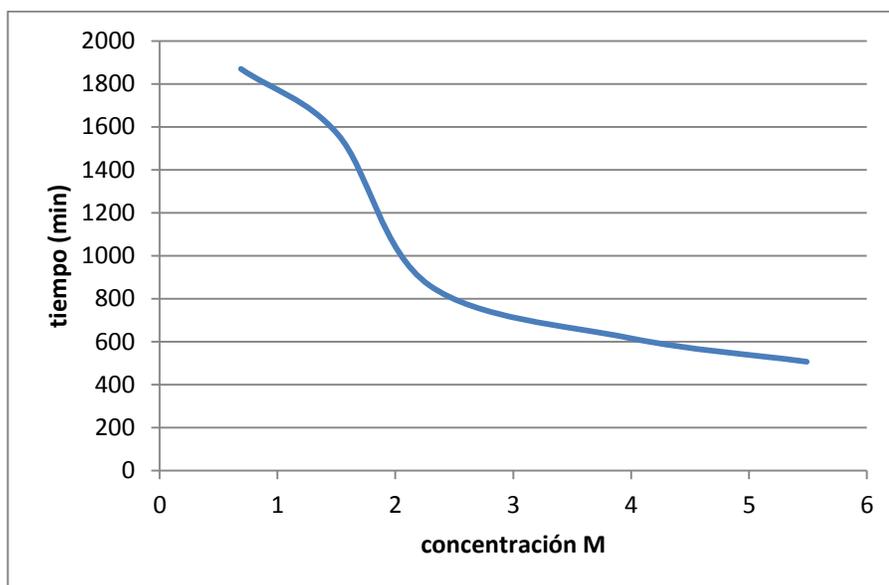
A continuación, en las tablas siguientes se muestran los resultados obtenidos de la realización de la experimentación y tabulación de datos.

Tabla XIII. **Tiempo de separación**

Solución	Concentración (M)	Tiempo	Promedio
1	0,69	30h 24m	31h 16m
		31h15m	
		31h 50m	
2	1,51	25h 14m	26h 06m
		26h 22m	
		26h 42m	
3	2,29	14h 23m	14h 21m
		15h 41m	
		13h 02m	
4	3,98	10h 35m	10h 18m
		9h 23m	
		10h 56m	
5	5,49	8h 13m	8h 27m
		7h 47m	
		9h 21m	

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Relación tiempo contra concentración**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Descripción de la relación tiempo contra concentración**

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
	$t = -55,41M^4 + 663,74M^3 - 2\,532,6M^2 + 3\,016,5M + 788,57$	1	[0,69-5,49] M

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Punto de inflexión tiempo versus concentración**

Ecuación	Segunda derivada	Punto inflexión
$-55,41M^4 + 663,74M^3 - 2\,532,6M^2 + 3\,016,5M + 788,57$	$-12(55,41)M^2 + 6(663,74)M - 2\,532,6 = 0$	2,99M

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Gastos de preparación**

Solución	Concentración (M)	Gastos (Q)
1	0,59	6,44
2	1,61	12,88
3	2,29	19,30
4	3,98	25,74
5	5,49	32,20

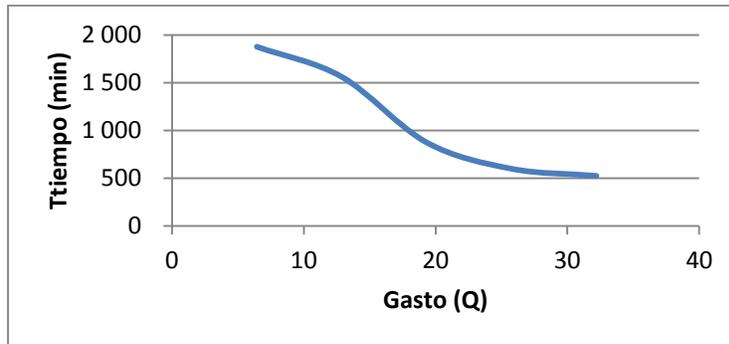
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Relación gasto–tiempo**

Solución	Concentración (M)	Gastos (Q)	Tiempo (Días)
1	0,69	6,44	30h 24m
			31h15m
			31h 50m
2	1,51	12,88	25h 14m
			26h 22m
			26h 42m
3	2,29	19,30	14h 23m
			15h 41m
			13h 02m
4	3,98	25,74	10h 35m
			9h 23m
			10h 56m
5	5,49	32,20	8h 13m
			7h 47m
			9h 21m

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Relación tiempo versus gasto**



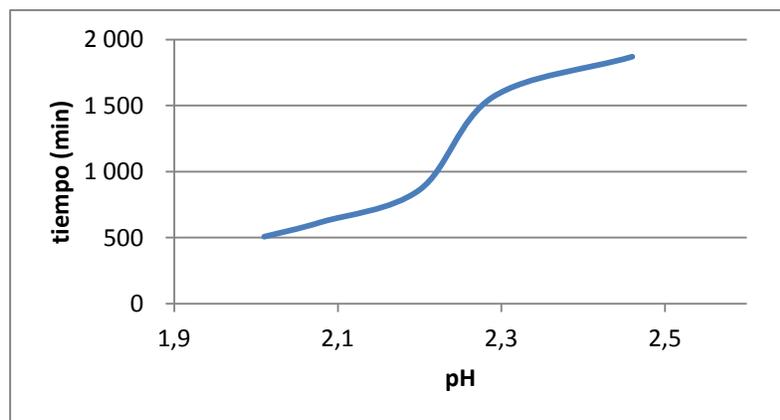
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Descripción de la relación tiempo versus gasto**

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
	$t = -56,88Q + 2\ 186,1$	0,9282	[6,44-32,20] Q

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Relación tiempo contra pH**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Descripción de la relación tiempo contra pH**

Color	Modelo matemático	R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
	t = -3 282pH – 6 162,9	0,9236	[2,01-2,46] Q

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Análisis de varianza**

ANOVA						
<i>Origen de la variación</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor f crítico</i>
Entre grupos	4346891.067	4	1 086 722,767	360,930	9,188E-11	3,478
Dentro de los grupos	30108.667	10	3 010,867			
Total	4376999.733	14				

Fuente: elaboración propia, Microsoft office Excel 2013.

Tabla XXI. **Análisis de varianza de un factor**

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Solución 1M	3	5 609	1 869	1 870
Solución 2M	3	4 698	1 566	2 128
Solución 3M	3	2 586	862	6 321
Solución 4M	3	1 854	618	2 379
Solución 5M	3	1 521	507	2 356

Fuente: elaboración propia, Microsoft office Excel 2013.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los datos obtenidos a partir de la realización del experimento muestran una tendencia que, según lo investigado previamente, era de esperarse. La concentración más alta separó el polietileno del aluminio en un menor tiempo y la concentración más baja fue en un mayor tiempo.

Analizando la concentración a 1 M, muestra un tiempo promedio de 31 horas 10 minutos siendo este el tiempo más grande en el experimento, esto se debe a que, como en la solución de 250 mL solo existían 14,29 mL de ácido acético puro, y como no existía la suficiente cantidad de reactivo este no atacó del todo las moléculas de polietileno adheridas al aluminio logrando una reacción redox lenta, provocando un mayor tiempo de separación.

Analizando la concentración a 2 M, muestra un tiempo promedio de 26 horas 10 min, siendo este el segundo tiempo más grande, en esta solución existían 28,59 mL de ácido acético puro, por lo que esta solución no es viable para realizar la separación, ya que se gasta poco, pero el tiempo supera el día.

Analizando la concentración a 3 M, muestra un tiempo promedio de 14 horas 36 minutos, siendo este el tiempo medio de las 5 concentraciones, en esta solución existían 42,89 mL de ácido acético puro logrando una reacción redox más rápida que en la primera solución.

Analizando la concentración a 4 M, muestra un tiempo promedio de 10 horas, siendo este el tiempo óptimo en el cual se separa exitosamente el aluminio del polietileno. En esta solución existían 57,19 mL de ácido acético

puro. En la figura 8 se observa la solución 4 M, esta muestra burbujas pegadas en el pliego LDPE-Al-LDPE, comprobando en efecto, que se da la reacción redox liberando hidrógeno molecular.

Analizando la concentración a 5 M, muestra un tiempo promedio de 8 horas 45 minutos, siendo este el tiempo más rápido en que se logra la separación del polietileno con el aluminio. En esta solución existían 71,55 mL de ácido acético puro, en ella la reacción redox se logra de una manera más rápida. Con esta solución se podrían separar 3 veces en un día, pero a un mayor costo.

Si se utilizara una mayor concentración de ácido igual el tiempo seguiría disminuyendo hasta llegar a un tiempo constante que sería usando el ácido en estado puro, esto no se realizó en el experimento ya que el objetivo es mostrar la separación, si se usara el ácido puro se tendrían pérdidas debido a que la solución solo es reusable 2 veces más.

Al observar la figura 7 se muestra un comportamiento en su pendiente negativo, mostrando una correlación de 0,93 indicando que no es lineal, pero mantiene su trayectoria descendiente, esto demuestra que en efecto, el tiempo de inmersión para que el aluminio se separe del polietileno en los pliegos de *tetrabrik* es inversamente proporcional a la concentración del ácido acético.

En la misma figura 7 se observa que existe un punto de inflexión en el cual la concentración de ácido acético será la más indicada para lograr la separación de los pliegos aluminio polietileno. Mediante la segunda derivada de la ecuación de la gráfica se encontró que este punto es en 2,99 M. En la figura también se marcan dos regiones, una comprendida por las soluciones 1M y 2M, (estas sería la región de baja concentración y alto tiempo), y otra región

comprendida por las soluciones 4M y 5M (esta sería la región de alta concentración y bajo tiempo).

Al observar la figura 8 se muestra un comportamiento en su pendiente negativo, con una correlación de 0,92 indicando que no es lineal, pero mantiene su trayectoria descendiente, esto demuestra que en efecto el tiempo de inmersión para que el aluminio se separe del polietileno en los pliegos de *tetrabrik* es inversamente proporcional al gasto que se requiere para preparar las solución es de ácido acético.

El análisis de varianza se realizó para brindar al investigador un criterio de las variaciones de tiempo que existían entre las soluciones y así determinar la mejor solución para lograr la separación; en la tabla XXI se muestran las comparaciones de las varianzas obtenidas entre las corridas de las 5 soluciones distintas. Las varianzas entre cada corrida realizada muestran una diferencia significativa entre cada valor, pero en la solución 3 molar se muestra una diferencia mayor a todas las demás, esto indica que en este punto se tiene una mayor variación y, por consiguiente, la mejor concentración para lograr la separación.

Como en todas las soluciones se muestra una diferencia significativa y dado que la prueba calculada no está dentro del rango de aceptación tomando un intervalo de confianza del noventa y cinco por ciento; se rechazan las hipótesis nulas y se aceptan las hipótesis alternativas, ya que al variar las concentraciones en la solución, representarán un cambio significativo en los tiempos para que el aluminio se separe del polietileno.

Se realizó una prueba de inmersión de papel aluminio sin polietileno en las soluciones 4M y 2M, los pliegos mostraron una degradación, lo que afirma que

sí se trabaja con una reacción redox. En la figura 13 se observa la solución 2M, esta muestra una tonalidad blanca en el papel aluminio. En la figura 12 se describe la solución 4M, esta muestra una degradación más intensa en el papel y muestra agujeros en el pliego y la tonalidad es diferente. Además se midió espesor de la muestra 4M en comparación al papel aluminio sin sumergir, como se observa en la figura 14, la muestra de aluminio sin sumergir da un dato de 0,02032 mm de espesor y en la figura 15, que es la muestra de 4M, se obtiene un dato de 0,01778 mm de espesor, esto confirma que en efecto hubo un reacción redox que consumió parte del aluminio inicial para dar aluminio +3.

## CONCLUSIONES

1. Las soluciones acuosas de ácido acético a diferentes concentraciones logran una separación exitosa de las láminas de aluminio–polietileno mediante el ataque redox.
2. La concentración mínima de ácido acético para la separación del aluminio en las láminas LDPE-AI-LDPE es 2,99 M.
3. El tiempo mínimo para que el aluminio se separe en las láminas LDPE-AI-LDPE es de 14 horas con la solución de 2,99 M.
4. El tiempo de inmersión para que el aluminio se separe del polietileno es inversamente proporcional a la concentración del ácido acético.
5. La mejor solución, según el análisis de varianza, es la de 2,99 M, mostrando una variación significativa en esta concentración de ácido acético.
6. La mejor solución según, el punto de inflexión, es la de 2,99 M mostrando un cambio en este punto de la gráfica.
7. El análisis de varianza muestra que existe una diferencia significativa entre las varianzas de los tiempos obtenidos en función de las concentraciones.



## RECOMENDACIONES

1. Se requiere de un constante control de los pliegos en inmersión y observar el momento cuando una capa de burbujas esté sobre el pliego de polietileno.
2. Dejar un peso en la muestra para que se posicione en el fondo del *beacker* y así lograr que el pliego de polietileno con aluminio se sumerja en su totalidad.
3. Al realizar la separación mecánica hacerlo con suavidad, procurando no tocar el pliego de aluminio, ya que este es muy frágil y puede llegar a romperse con facilidad.
4. Se puede realizar este experimento a planta piloto para obtener resultados con precios más aproximados a la realidad.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Ácido Acético, *Molécula del ácido acético*. [en línea] [http://www.ecured.cu/%C3%81cido\\_ac%C3%A9tico](http://www.ecured.cu/%C3%81cido_ac%C3%A9tico) [Consulta: 6 de marzo de 2016].
2. BAEZA, Alejandro. *Reactividad química, equilibrio forzado y diagramas logarítmicos de concentración*. [en línea] [http://depa.fquim.unam.mx/ayd/archivero/DOC\\_APOY\\_4C\\_Reactividad\\_quimica\\_DIAGRAMAS\\_2010\\_II\\_11100.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/ayd/archivero/DOC_APOY_4C_Reactividad_quimica_DIAGRAMAS_2010_II_11100.pdf). [Consulta: 5 de marzo de 2016].
3. BILLMEYER, Fred. *Ciencia de los polímeros*. España: Reverté, 2004. 581 p.
4. CAREY, Francis. *Química orgánica*. México: McGraw-Hill, 2006. 1108 p.
5. CONDE, Lucena. *Química analítica cualitativa 18a*. España: Thomson Editores ISBN: 978-84-9732-140-2. 2000, 180 p.
6. Confederación Española de Empresarios de Plásticos. Centro Español de Plásticos. *Los plásticos: materiales de nuestro tiempo*. Barcelona, España. ANAIP y CEP, B-25033-91, 191 160 p.

7. FIUSAC, Área de Estadística, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Área de estadística. [en línea]. <http://www.estadistica.ingenieria.usac.edu.gt>. [Consulta 10 de julio de 2015].
8. JENKINS, David. *Química del agua*. 2a. España: Limusa, 1987. 508 p.
9. McMURRY, John. *Química orgánica*. 6a ed. México: Thomson Learning, 2004. 1284 p.
10. MSDS. *Hoja de seguridad ácido acético*. [en línea] <http://www.uacj.mx/IIT/CICTA/Documents/Acidos/Acido%20Ac%203%A9tico.pdf>. [Consulta: 6 de marzo de 2016].
11. OXIDACIÓN. *Oxidación del aluminio*. [en línea] <http://www.quimitube.com/oxidacion-aluminio>. [Consulta: 6 de abril de 2016].
12. POTENCIALES. *Potenciales de reducción*: [en línea] <http://quimica4m.blogspot.com/2010/01/potenciales-de-reduccion.htm>. [Consulta: 6 de abril de 2016].
13. REACCIÓN. *Reacción aluminio ácido acético*: [en línea] <http://www.todoexpertos.com/categorias/ciencias-e-ingenieria/quimica/respuestas/1579346/que-reaccion-es>. [Consulta: 6 de abril de 2016].

14. STANLEY, Manahan. *Environmental Science and technology*, CRC lewis, 1997. 641 p.
15. TETRAPAK. *Capas de tetrapak*: [en línea] <http://www.guatesostenible.com/proceso-de-reciclaje-de-tetra-pak-en-guatemala/>. [Consulta: 25 de octubre de 2014].
16. WILLIAM, Daub. *Introducción a la química*. 8a ed. California: Pearson, 2004. 488 p.
17. WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a. ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1999. 752 p.



# APÉNDICES

## Apéndice 1. Análisis estadístico

### Corrida Núm. 1: media aritmética

Tomando los valores obtenidos de la solución 1 concentración 1M y convirtiendo el tiempo a minutos se calculará la media.

$$n = 3$$

$$x_1 = 1824 \text{ min}$$

$$x_2 = 1875 \text{ min}$$

$$x_3 = 1910 \text{ min}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$$

$$\bar{X} = 31 \text{ horas } 24 \text{ min}$$

Las medias se muestran en la siguiente tabla:

**Media aritmética**

Solución	Concentración (M)	media (horas)
1	1	31:10
2	2	26:06
3	3	14:21
4	4	10:18
5	5	08:27

**Corrida Núm. 1: desviación estándar**

Tomando los valores obtenidos de la solución 1 concentración 1M y convirtiendo el tiempo a minutos se calculará la desviación estándar.

$$n = 3$$

$$x_1 = 1\ 824 \text{ min}$$

$$x_2 = 1\ 875 \text{ min}$$

$$x_3 = 1\ 910 \text{ min}$$

$$\bar{X} = 1\ 869,667 \text{ min}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$s = \sqrt{s^2}$$
$$s = 43.25 \text{ min}$$

Las desviaciones se muestran en la siguiente tabla:

### Desviación estándar

Solución	Concentración (M)	Desviación (min)
1	1	43:25
2	2	46:13
3	3	79:50
4	4	48:77
5	5	48:54

### Corrida Núm. 1: varianza

Tomando los valores obtenidos de la solución 1 concentración 1M y convirtiendo el tiempo a minutos se calculará la varianza.

$$n = 3$$

$$\bar{X} = 1\ 869,667 \text{ min}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

$$\sigma^2: 20 \text{ horas } 47 \text{ min}$$

Las varianzas se muestran en la siguiente tabla:

### Varianza

Solución	Concentración (M)	Desviación (horas)
1	1	31:9
2	2	35:38
3	3	105:21
4	4	39:39
5	5	39:15

### Corrida Núm. 1: Análisis varianza

Tomando todos los valores de las corridas se realiza el análisis de varianzas con las fórmulas de Anova.

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{T_r^2}{nk}$$

$$SSA = \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n} - \frac{T_r^2}{nk}$$

$$SSE = SST - SSA$$

El análisis de varianza se muestra en la siguiente tabla:

### Análisis de varianza

ANOVA						
<i>Origen de la variación</i>	<i>suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor f crítico</i>
Entre grupos	4 346 891,067	4	1 086 722,767	360,930	9,188E-11	3,478
Dentro de los grupos	30 108,667	10	3 010,867			
Total	4 376 999,733	14				

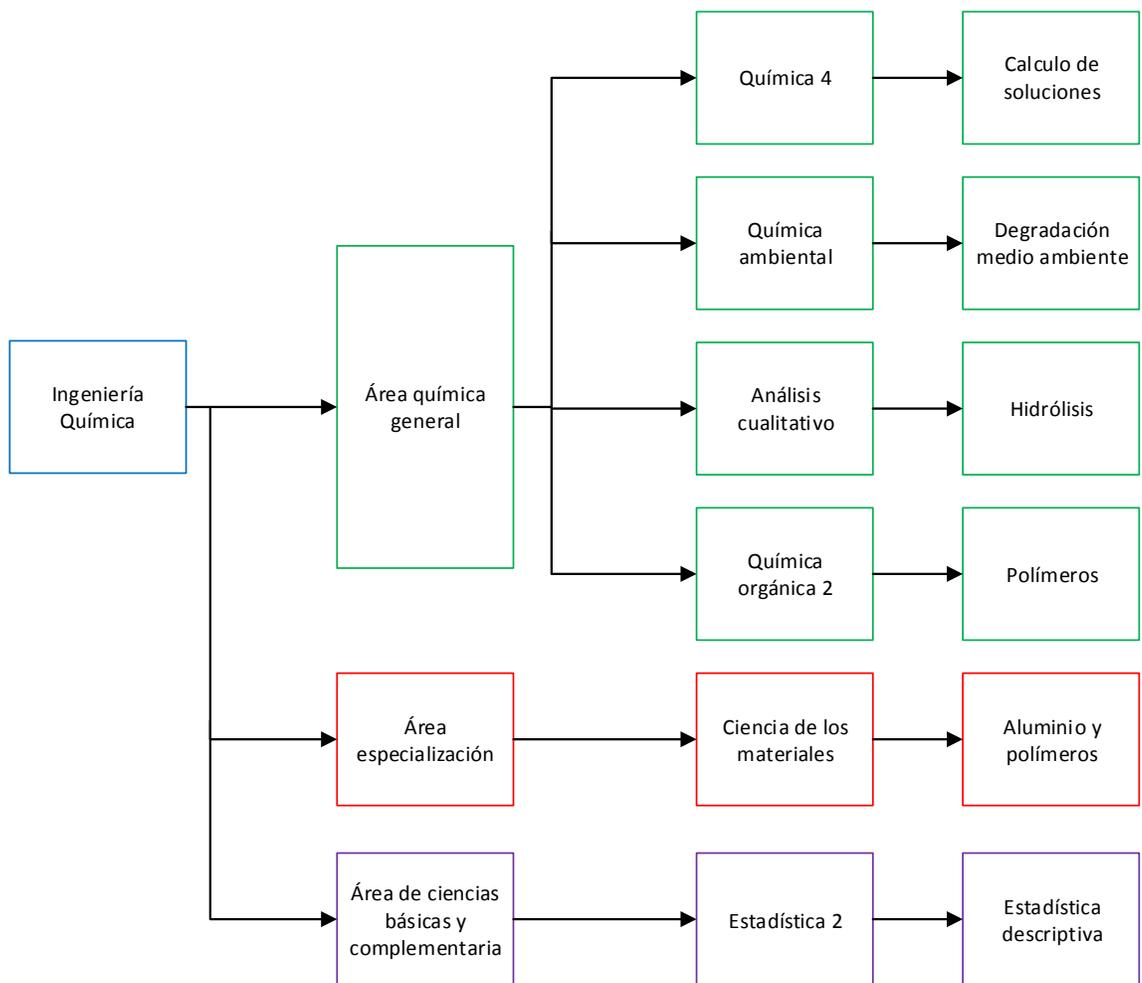
### Análisis de varianza de un factor

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Solución 1M	3	5 609	1 869	1 870
Solución 2M	3	4 698	1 566	2 128
Solución 3M	3	2 586	862	6 321
Solución 4M	3	1 854	618	2 379
Solución 5M	3	1 521	507	2 356

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft office Excel 2013.

## Apéndice 2. Requisitos académicos

### Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Muestra de cálculo de pH's teóricos de las soluciones

#### Corrida 1: pH's teóricos

Tomando los valores de la solución de 3M.

$$pH = \frac{pKa}{2} + \frac{pCa}{2}$$

Para:

$$pKa = 1,8 \times 10^{-5}$$

$$pCa = -0,477$$

$$pH = \frac{4,74}{2} + \frac{-0,477}{2}$$

$$pH = 2,13$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los pH's teóricos de todas las soluciones.

#### pH's teóricos de las soluciones

Solución (M)	$[H^+]$	pH
1	0,00423365	2,37
2	0,00599101	2,22
3	0,00733947	2,13
4	0,00847629	2,07
5	0,00947784	2,02

### pH's reales de las soluciones

Solución (M)	$[H^+]$	pH
0.69	0,00346736	2,46
1.51	0,00512861	2,29
2.29	0,00630957	2,20
3.98	0,00831763	2,08
5.49	0,00977237	2,01

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 4. Concentraciones reales de ácido acético

##### Corrida 1: concentraciones reales

Tomando en cuenta los valores para la solución de 3M se calcula la concentración.

$$\left(pH - \frac{pKa}{2}\right)^2 = pCa$$

Para:

pH: 2,20

pKa: 4,74

Despejando para Ca se obtiene:

$$Ca = 10^{-\left(pH - \frac{pKa}{2}\right)^2}$$

$$Ca = 10^{-\left(2,20 - \frac{4,74}{2}\right)^2}$$

$$Ca = 2,29$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las concentraciones de las diferentes soluciones.

### Concentraciones reales de las soluciones

Solución	pH	Ca
1	2,46	0,69
2	2,29	1,51
3	2,20	2,29
4	2,08	3,98
5	2,01	5,49

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 5. Punto de inflexión tiempo contra concentración

El punto de inflexión de la gráfica tiempo contra concentración se obtiene mediante la segunda derivada de la ecuación de la gráfica mostrada en la tabla 14.

$$F(x) -55,41M^4 + 663,74M^3 - 2\,532,6M^2 + 3\,016,5M + 788,57$$

$$F'(x) -4(55,41)M^3 + 3(663,74)M^2 - 2\,532,6M$$

$$F''(x) -12(55,41)M^2 + 6(663,74)M - 2\,532,6$$

Igualando a cero y despejando para M se obtiene el punto de inflexión de la segunda derivada en la gráfica tiempo contra concentración.

$$-12(55,41)M^2 + 6(663,74)M - 2\,532,6 = 0$$

$$M = 2,994$$

La concentración donde se tiene el punto de inflexión es de 2,99 molar.

## Apéndice 6. Muestra de cálculo de las soluciones

Para concentración 1M

$$\frac{1\text{mol}}{L} * \frac{60,05\text{g}}{1\text{mol}} * 0,25L * \frac{\text{mL}}{1,05\text{g}} = 14,29 \text{ mL}$$

Para concentración 2M

$$\frac{2\text{mol}}{L} * \frac{60,05\text{g}}{1\text{mol}} * 0,25L * \frac{\text{mL}}{1,05\text{g}} = 28,59 \text{ mL}$$

Para concentración 3M

$$\frac{3\text{mol}}{L} * \frac{60,05\text{g}}{1\text{mol}} * 0,25L * \frac{\text{mL}}{1,05\text{g}} = 42,89 \text{ mL}$$

Para concentración 4M

$$\frac{4\text{mol}}{L} * \frac{60,05\text{g}}{1\text{mol}} * 0,25L * \frac{\text{mL}}{1,05\text{g}} = 57,10 \text{ mL}$$

Para concentración 5M

$$\frac{5\text{mol}}{L} * \frac{60,05\text{g}}{1\text{mol}} * 0,25L * \frac{\text{mL}}{1,05\text{g}} = 71,48 \text{ mL}$$

### Cantidad de ácido acético en solución

Concentración (M)	Cantidad de ácido acético (mL)
1	14,29
2	28,59
3	42,89
4	57,19
5	71,48

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 7. Grado de disociación del ácido acético

### Corrida 1: Grado de disociación

Se toman los valores de la concentración 1M para encontrar el grado de disociación.

$$\alpha_1 = \frac{ka}{[H^+] + ka}$$

Para

$$Ka = 1.8 \times 10^{-5}$$

$$[H^+] = 0.00346736$$

$$\alpha_1 = \frac{1,8 \times 10^{-5}}{0,00346736 + 1,8 \times 10^{-5}}$$
$$\alpha_1 = 0,0051$$

En la siguiente tabla se muestran los grados de disociación de todas las concentraciones.

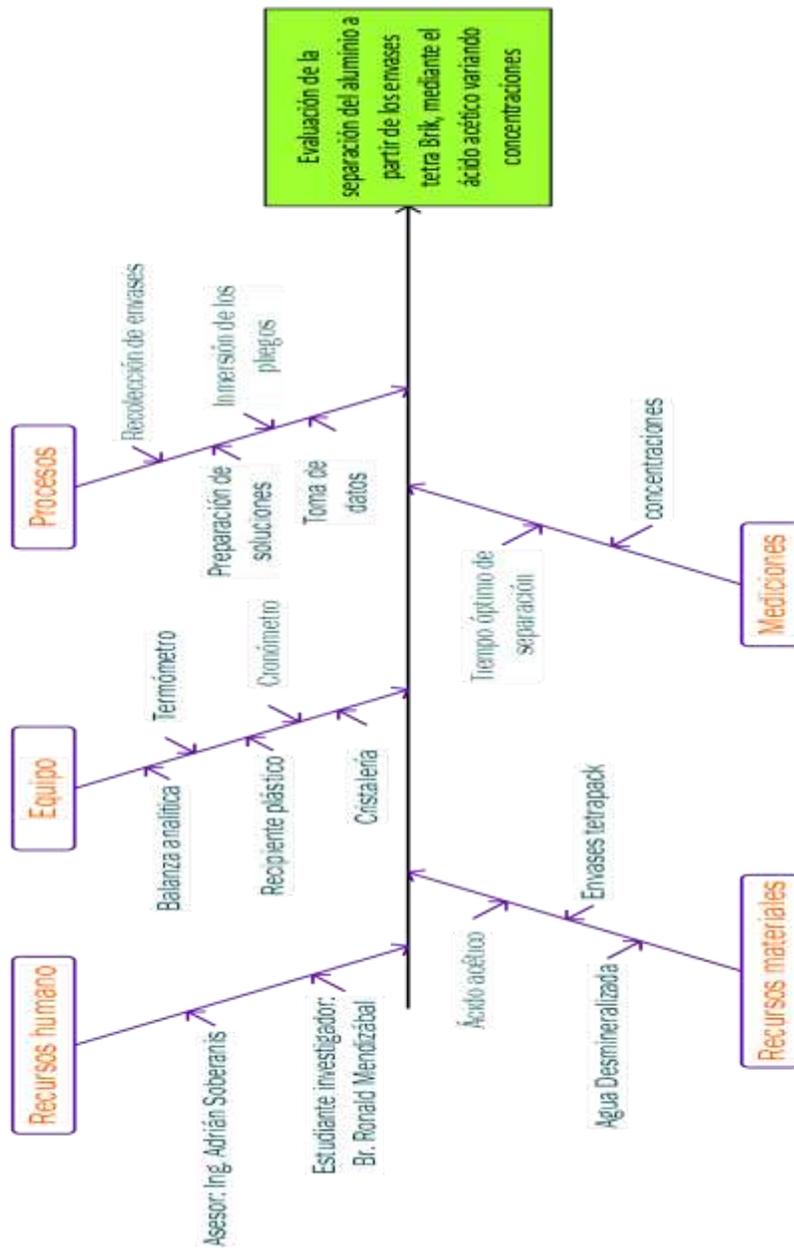
### Grado de disociación

Solución (M)	$\alpha$ 1 %
0,69	0,51
1,51	0,34
2,29	0,28
3,98	0,21
5,49	0,18

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 8. Diagrama de Ishikawa

Figura 10. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Tabla de potenciales estándar de reducción**

**Tabla de potenciales estándar de reducción**

Elemento	Reacción de electrodos	Potencial de reducción E° en volts
Li	$\text{Li}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Li}$	- 3,045
K	$\text{K}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{K}$	- 2,925
Ca	$\text{Ca}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ca}$	- 2,870
Na	$\text{Na}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Na}$	- 2,714
Mg	$\text{Mg}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	- 2,370
Al	$\text{Al}^{+3} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Al}$	- 1,660
Zn	$\text{Zn}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	- 0,763
Cr	$\text{Cr}^{+3} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	- 0,740
Fe	$\text{Fe}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	- 0,440
Cd	$\text{Cd}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cd}$	- 0,403
Ni	$\text{Ni}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	- 0,250
Sn	$\text{Sn}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Sn}$	- 0,140
Pb	$\text{Pb}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	- 0,126
H <sub>2</sub>	$2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0,000
Cu	$\text{Cu}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+ 0,337
I <sub>2</sub>	$\text{I}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{I}^-$	+ 0,535
Hg	$\text{Hg}^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Hg}$	+ 0,789
Ag	$\text{Ag}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	+ 0,799
Br <sub>2</sub>	$\text{Br}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$	+ 1,080
Cl <sub>2</sub>	$\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+ 1,360
Au	$\text{Au}^{+3} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Au}$	+ 1,500
F <sub>2</sub>	$\text{F}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{F}^-$	+ 2,870

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Tabla de distribución F de Fisher


 Universidad de San Carlos de Guatemala  
 Facultad de Ingeniería  
 Área de Estadística  
 Coordinación



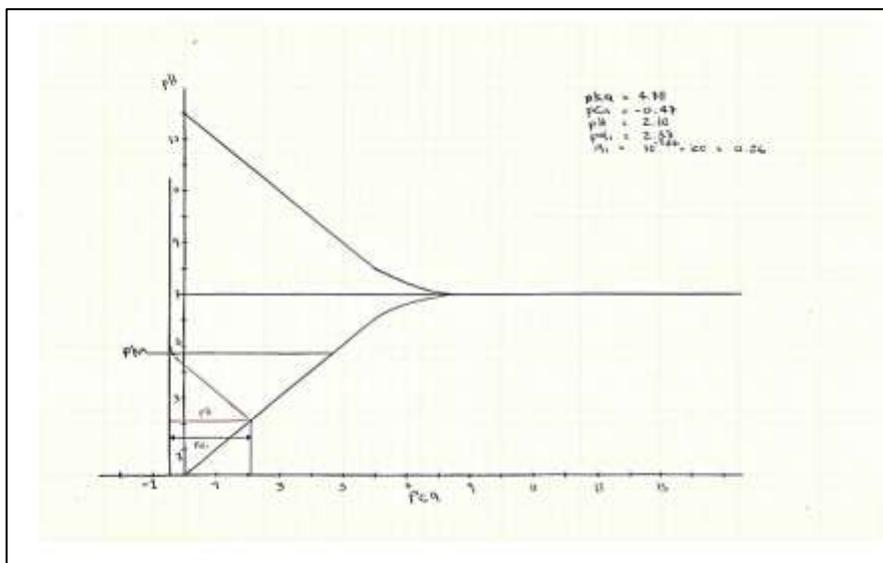
Valores críticos de la distribución F de Fisher  
 $\alpha = 0.10$

V2 \ V1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	Inf
1	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86	60.19	60.71	61.21	61.74	62.00	62.26	62.53	62.79	63.06	63.32
2	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39	9.41	9.42	9.44	9.45	9.46	9.47	9.47	9.48	9.49
3	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23	5.22	5.20	5.18	5.18	5.17	5.16	5.15	5.14	5.13
4	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92	3.90	3.87	3.84	3.83	3.82	3.80	3.79	3.78	3.78
5	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30	3.27	3.24	3.21	3.19	3.17	3.16	3.14	3.12	3.11
6	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94	2.90	2.87	2.84	2.82	2.80	2.78	2.76	2.74	2.72
7	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70	2.67	2.63	2.59	2.56	2.54	2.51	2.49	2.47	2.47
8	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54	2.50	2.46	2.42	2.40	2.38	2.36	2.34	2.32	2.29
9	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42	2.38	2.34	2.30	2.28	2.25	2.23	2.21	2.18	2.16
10	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32	2.28	2.24	2.20	2.18	2.16	2.13	2.11	2.08	2.06
11	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.21	2.17	2.13	2.10	2.08	2.05	2.03	2.00	1.97
12	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.15	2.10	2.06	2.04	2.01	1.99	1.96	1.93	1.90
13	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.10	2.05	2.01	1.98	1.96	1.93	1.90	1.88	1.85
14	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.91	1.89	1.86	1.83	1.80
15	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	2.02	1.97	1.92	1.90	1.87	1.85	1.82	1.79	1.76
16	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.99	1.94	1.89	1.87	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72
17	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.96	1.91	1.86	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69
18	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.93	1.88	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66
19	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96	1.91	1.86	1.81	1.79	1.76	1.73	1.70	1.67	1.63
20	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94	1.89	1.84	1.79	1.77	1.74	1.71	1.68	1.64	1.61
21	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95	1.92	1.87	1.83	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59
22	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93	1.90	1.86	1.81	1.76	1.73	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57
23	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.95	1.92	1.89	1.84	1.80	1.74	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59	1.55
24	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91	1.88	1.83	1.78	1.73	1.70	1.67	1.64	1.61	1.57	1.53
25	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89	1.87	1.82	1.77	1.72	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52
26	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88	1.86	1.81	1.76	1.71	1.68	1.65	1.61	1.58	1.54	1.50
27	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87	1.85	1.80	1.75	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57	1.53	1.49
28	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87	1.84	1.79	1.74	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52	1.48
29	2.89	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86	1.83	1.78	1.73	1.68	1.65	1.62	1.58	1.55	1.51	1.47
30	2.88	2.49	2.28	2.14	2.05	1.98	1.93	1.88	1.85	1.82	1.77	1.72	1.67	1.64	1.61	1.57	1.54	1.50	1.46
31	2.87	2.48	2.27	2.14	2.04	1.97	1.92	1.88	1.84	1.81	1.77	1.71	1.66	1.63	1.60	1.56	1.53	1.49	1.45
32	2.87	2.48	2.26	2.13	2.04	1.97	1.91	1.87	1.83	1.81	1.76	1.71	1.65	1.62	1.59	1.56	1.52	1.48	1.44
33	2.86	2.47	2.26	2.12	2.03	1.96	1.91	1.86	1.83	1.80	1.75	1.70	1.64	1.61	1.58	1.55	1.51	1.47	1.43
34	2.86	2.47	2.25	2.12	2.02	1.96	1.90	1.86	1.82	1.79	1.75	1.69	1.64	1.61	1.58	1.54	1.50	1.46	1.42
35	2.85	2.46	2.25	2.11	2.02	1.95	1.90	1.85	1.82	1.79	1.74	1.69	1.63	1.60	1.57	1.53	1.50	1.46	1.41
36	2.85	2.46	2.24	2.11	2.01	1.94	1.89	1.85	1.81	1.78	1.73	1.68	1.63	1.60	1.56	1.53	1.49	1.45	1.40
37	2.85	2.45	2.24	2.10	2.01	1.94	1.89	1.84	1.81	1.78	1.73	1.68	1.62	1.59	1.56	1.52	1.48	1.44	1.40
38	2.84	2.45	2.23	2.10	2.01	1.94	1.88	1.84	1.80	1.77	1.72	1.67	1.61	1.58	1.55	1.52	1.48	1.44	1.39
39	2.84	2.44	2.23	2.09	2.00	1.93	1.88	1.83	1.80	1.77	1.72	1.67	1.61	1.58	1.55	1.51	1.47	1.43	1.38
40	2.84	2.44	2.23	2.09	2.00	1.93	1.87	1.83	1.79	1.76	1.71	1.66	1.61	1.57	1.54	1.51	1.47	1.42	1.38
60	2.79	2.39	2.18	2.04	1.95	1.87	1.82	1.77	1.74	1.71	1.66	1.60	1.54	1.51	1.48	1.44	1.40	1.35	1.29
100	2.76	2.36	2.14	2.00	1.91	1.83	1.78	1.73	1.69	1.66	1.61	1.56	1.49	1.46	1.42	1.38	1.34	1.28	1.22
120	2.75	2.35	2.13	1.99	1.90	1.82	1.77	1.72	1.68	1.65	1.60	1.55	1.48	1.45	1.41	1.37	1.32	1.26	1.19
Inf	2.71	2.30	2.08	1.95	1.85	1.77	1.72	1.67	1.63	1.60	1.55	1.49	1.42	1.38	1.34	1.30	1.24	1.17	1.03

Fuente: Fiusac, Área de Estadística, Universidad de San Carlos de Guatemala.

## Apéndice 11. Diagrama de Sillen

### Diagrama de sillen solución 2,99M



### pH's con diagrama de Sillen

Solución (M)	pH
0,69	2,46
1,51	2,29
2,29	2,20
3,98	2,08
5,49	2,01

### Grado de disociación con diagrama de Sillen

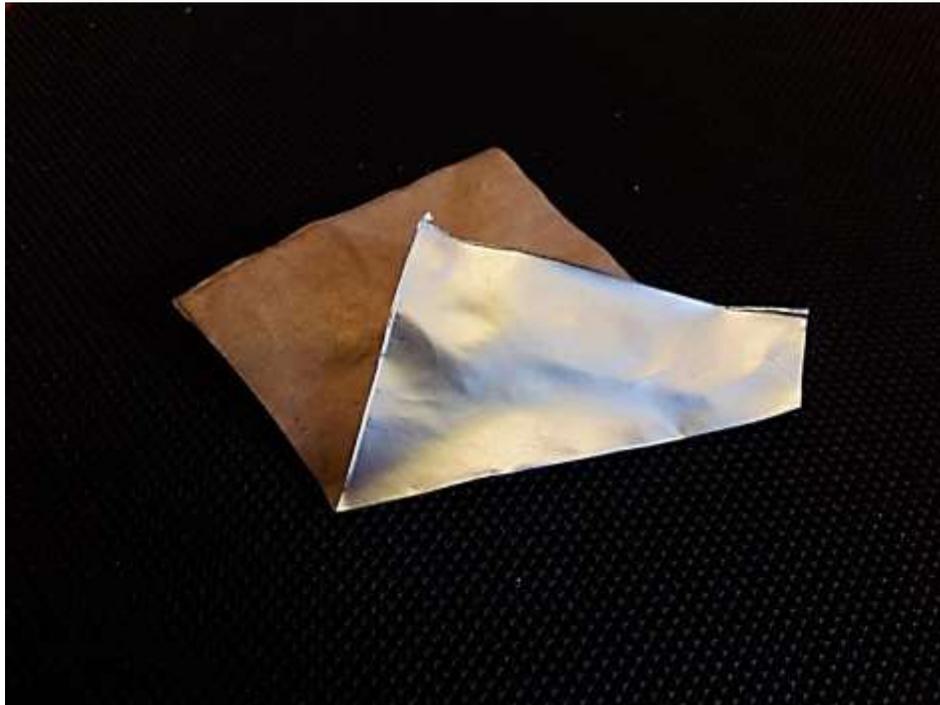
Solución (M)	$\alpha_1$
0,69	0,31
1,51	0,22
2,29	0,28
3,98	0,16
5,49	0,15

Fuente: elaboración propia.



## ANEXOS

### Anexo 1. Pliego de *tetrabrik* antes del remojo



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 2. **Pliego de *tetrabrik* en remojo para separar celulosa**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 3. **Pliego de *tetrabrik* sin celulosa**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 4. **Preparación de soluciones de ácido acético**



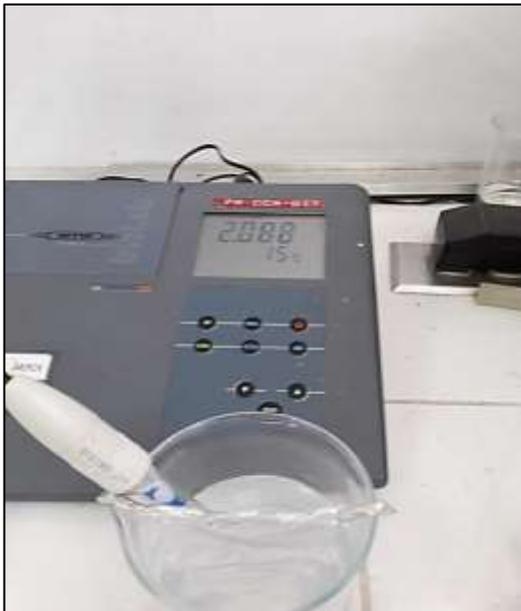
Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 5. **Solución 4M**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 6. **pH real solución 4M**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 7. **Muestra exfoliada**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 8. **Muestras de aluminio sin polietileno solución 4M y 2M**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 9. **Muestra de aluminio sin polietileno solución 4M**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 10. **Muestra de aluminio sin polietileno solución 2M**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 11. **Espesor de las muestra de aluminio sin sumergir**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 12. **Espesor de la muestra de aluminio 4M**



Fuente: Laboratorio 1 de Química, edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala.