



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

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE REHIDRATACIÓN DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO
IÓNICO ELABORADA A PARTIR DE LA SULFONACIÓN Y ENTRECruzAMIENTO DE LA
MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO DE ORIGEN RECICLADO**

Karen Aracely Gatica Solares

Asesorado por la Ph.D. Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña

Coasesorado por el Ing. Óscar Giovanni Córdova Recinos

Guatemala, julio de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE REHIDRATACIÓN DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO
IÓNICO ELABORADA A PARTIR DE LA SULFONACIÓN Y ENTRECruzAMIENTO DE LA
MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO DE ORIGEN RECIKLADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

KAREN ARACELY GATICA SOLARES

ASESORADO POR LA PH.D. INGA. CASTA PETRONA ZECEÑA ZECEÑA
COASESORADO POR EL ING. ÓSCAR GIOVANNI CÓRDOVA RECINOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, JULIO DE 2015

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. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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 DEL PROCESO DE REHIDRATACIÓN DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO ELABORADA A PARTIR DE LA SULFONACIÓN Y ENTRECruzAMIENTO DE LA MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO DE ORIGEN RECICLADO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 02 de julio de 2014.



Karen Aracely Gatica Solares



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIENCIAS
ÁREA QUÍMICA

Guatemala, 18 de mayo de 2015

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdés
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

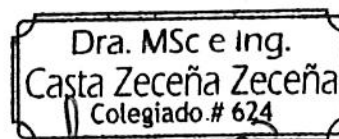
Estimado Ingeniero:

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 del proceso de rehidratación de una resina de intercambio iónico elaborada a partir de la sulfonación y entrecruzamiento de la matriz polimérica de poliestireno expandido de origen reciclado”**, el cual fue realizado por la estudiante de Ingeniería Química: **Karen Aracely Gatica Solares**, identificado con el carné No. **201113849**.

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”



Casta Zeceña Zeceña
Dra. Casta Petrona Zeceña Zeceña
Colegiado No. 624
Asesora de Trabajo de Graduación



Guatemala, 10 de julio de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.037.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **016-2014** 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 la estudiante universitaria: **Karen Aracely Gatica Solares**.
Identificada con número de carné: **2011-13849**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.


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 DEL PROCESO DE REHIDRATACIÓN DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO ELABORADA A PARTIR DE LA SULFONACIÓN Y ENTRECruzAMIENTO DE LA MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO DE ORIGEN RECICLADO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Casta Petrona Zeceña Zeceña**.

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"


Ingg. Mercedes Esther Roquel Chávez
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.096.2015

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 de la estudiante, **KAREN ARACELY GATICA SOLARES** titulado: **"EVALUACIÓN DEL PROCESO DE REHIDRATACIÓN DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO ELABORADA A PARTIR DE LA SULFONACIÓN Y ENTRECruzAMIENTO DE LA MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO DE ORIGEN RECICLADO"**.
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. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, julio 2015

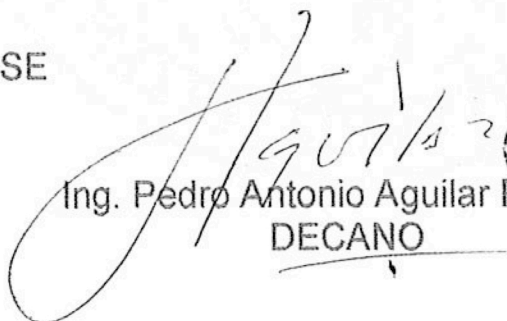
Cc: Archivo
VMMV/ale






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 DEL PROCESO DE REHIDRATACIÓN DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO ELABORADA A PARTIR DE LA SULFONACIÓN Y ENTRECruzAMIENTO DE LA MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO DE ORIGEN RECICLADO**, presentado por la estudiante universitaria: **Karen Aracely Gatica Solares**, 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, julio de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por tu infinita gracia, misericordia y amor. Por llenar mi vida de bendiciones y darme sabiduría, temple y fortaleza para alcanzar cada una de mis metas.

Virgen María

Por guiar mis pasos en los momentos más difíciles de la vida y por interceder por mí ante tu hijo Jesús.

Mi padre

Jaime Arturo Gatica García, tu ejemplo, dedicación e infinito amor serán siempre la mayor de mis inspiraciones. Porque siempre me enseñaste a luchar por lo que quiero y por ser mi modelo a seguir. Papá, pronto podrás decir que somos colegas. Te amo.

Mi madre

Milvia Aracely Solares de Gatica, por enseñarme el valor de la vida y el amor verdadero. Gracias mamá, por ser mi mejor amiga, mi consuelo y mi confidente. Porque con tu ejemplo he aprendido a trascender y ser una triunfadora. Sin ti no sería la mujer que ahora soy. Te amo.

Mis hermanos

Claudia, Mercedes y Ángel Gatica Solares, por ser mis eternos cómplices y llenar mi vida de felicidad. Gracias por siempre acompañarme y guiarme con su ejemplo de grandeza.

Mi abuela

Blanca Estela Solares, por su inmenso amor y cuidados, que han sido mi mayor ejemplo de superación y nobleza.

Mi abuela

Marta Raquel García vda. de Gatica (q. e. p. d.), quien desde el cielo celebra con nosotros. Por enseñarme el valor del servicio.

Mis tíos

Rafael Morales, Jorge Morales, Angélica de Evans, Gilda Gatica, Irma de Quezada y Edgar Gatica, por estar siempre presentes en mi vida.

Mis primos

Por su cariño y apoyo.

Pedro García

Por tu apoyo, ánimo, comprensión, cariño y constancia. Gracias por hacer muchas de mis decisiones más fáciles, por guiarme, por siempre acompañarme y porque a pesar de las adversidades, llenas mis días de felicidad.

Diego Cabrera

Por todo tu cariño, que me ha ayudado a seguir adelante. Gracias por enseñarme el valor de la verdadera amistad. Te quiero.

Ronald Echeverría

Por acompañarme durante este largo recorrido. Gracias por todo tu apoyo y comprensión. Pero sobre todo por tu cariño y felicidad.

Mis amigos

Javier Hernández, Jorge García, Jesica Díaz, Henry Ortiz, Kevin Mendoza, Manuel Contreras y Marcela Mazariegos, por todas las aventuras que desde niños hemos vivido.

Mis amigos

José Reyes, Dayanne Zelada, Gabriel Solórzano, Selvyin Solórzano, Janiel Coyoy, Pablo Méndez, Danilo Ajcip, Edy Payes, Mario Arévalo, Mildred Ola, Luis Linares y Alexandra García, por hacer este camino mucho más fácil, acompañado de su alegría y apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudio que inculcó los valores que definirán mi éxito profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme el conocimiento que permitirá mi ejercicio profesional.
Escuela de Ingeniería Química	Por brindarme las herramientas para mi desarrollo.
Mi asesora	Ph.D. Casta Zeceña, por su apoyo, comprensión y paciencia en la constante revisión y asesoría de esta investigación. Por alentarme a la excelencia y a siempre seguir adelante.
Mi coasesor	Ing. Óscar Córdova, por su asesoría y apoyo.
Departamento de Química General	Por ser mi segundo hogar.
Mis profesores	Por ser el vínculo entre el conocimiento y la enseñanza.

**Embotelladora La
Mariposa, S. A.**

Especialmente al Ing. Keny López, por permitirme desarrollar mis prácticas profesionales. Todo el conocimiento y experiencia adquiridos han sido completamente enriquecedores.

**A todos los que
colaboraron con mi
formación**

Por su apoyo. Muchas gracias.

2.3.1.	Aplicación del PS sulfonado entrecruzado como intercambiador de iones	10
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	15
3.1.	Variables	15
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	22
3.3.	Recursos humanos disponibles	23
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	23
3.4.1.	Reactivos.....	25
3.4.2.	Cristalería e instrumentos de medición	25
3.4.3.	Equipo	26
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	27
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	27
3.6.1.	Porcentaje de regeneración de la capacidad de fraccionamiento de una sal neutra.....	32
3.6.2.	Porcentaje de regeneración de la capacidad total de intercambio iónico.....	32
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	32
3.8.	Análisis estadístico.....	40
3.8.1.	Diseño experimental.....	40
3.8.2.	Medidas de tendencia central.....	41
3.8.2.1.	Media aritmética	41
3.8.3.	Medidas de dispersión	41
3.8.3.1.	Varianza	42
3.8.3.2.	Desviación estándar	42
4.	RESULTADOS.....	43
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	51

6.	CONCLUSIONES.....	57
	RECOMENDACIONES.....	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	61
	APÉNDICES	63
	ANEXOS	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Polimerización vinílica por radicales libres del estireno.....	3
2.	Identificación del poliestireno según código de identificación de plásticos.	4
3.	Reacción química en la formación de poliestireno sulfonado.....	8
4.	Reacción entre PS y óleum para la formación de PS sulfonado entrecruzado.	9
5.	Estructura molecular del polímero entrecruzado entre el estireno, divinilbenceno y el estireno sulfonado de sodio.	10
6.	Estructuras moleculares de algunos polímeros sintéticos que tienen aplicación en el intercambio iónico.....	12
7.	Cajas del <i>kit</i> de pruebas de DQO.....	24
8.	Material de empaque de televisores SAMSUNG.	24
9.	Densidad de retrolavado, según Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), sección 18-2.....	28
10.	Retención máxima de agua según Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), sección 11-17.....	29
11.	Capacidad de fraccionamiento de una sal neutra, según Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), sección 33-41	30
12.	Capacidad total de intercambio iónico, según Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), sección 42-50.....	31
13.	Comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico por masa húmeda de la resina rehidratada respecto a la inicial.....	44

14.	Comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico por masa seca de la resina rehidratada respecto a la inicial.....	45
15.	Comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado de la resina rehidratada respecto a la inicial.	46
16.	Comparación de la densidad de retrolavado de la resina de elaborada a partir de poliestireno expandido de origen reciclado, respecto a la resina comercial Purofine PFC-100.....	47
17.	Comparación del porcentaje de retención máxima de agua de la resina de elaborada a partir de poliestireno expandido de origen reciclado, respecto a la resina comercial Purofine PFC-100.	48
18.	Comparación de la capacidad total de intercambio iónico de la resina de elaborada a partir de poliestireno expandido de origen reciclado, respecto a la resina comercial Purofine PFC-100.	49

TABLAS

I.	Variables presentes en el proceso de desgasificación de PSE.	16
II.	Variables presentes en el proceso de sulfonación del PS y elaboración de la sal sódica de la resina	17
III.	Variables presentes en el proceso de evaluación de la densidad de retrolavado de la resina	18
IV.	Variables presentes en el proceso de evaluación de la capacidad máxima de retención de agua de la resina	18
V.	Variables presentes en el proceso de evaluación de la capacidad total de intercambio iónico de la resina.....	19
VI.	Variables presentes en el proceso de evaluación de la capacidad de <i>salt-splitting</i> de la resina	20

VII.	Variables presentes en el proceso de evaluación de la capacidad de regeneración de la resina	21
VIII.	Parámetros de control desgasificación de poliestireno expandido.....	33
IX.	Parámetros de control sulfonación del poliestireno y elaboración de la sal sódica de la resina	33
X.	Parámetros de control para determinar la densidad de la resina de poliestireno	34
XI.	Parámetros de control para determinar la capacidad máxima de retención de agua	34
XII.	Parámetros de control para determinar la capacidad total de intercambio iónico por peso de resina húmeda.....	35
XIII.	Parámetros de control para determinar la capacidad total de intercambio iónico por peso de resina seca	35
XIV.	Parámetros de control para determinar la capacidad total de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado	36
XV.	Parámetros de control para determinar la capacidad de <i>salt-splitting</i> por peso de resina húmeda.....	36
XVI.	Parámetros de control para determinar la capacidad de <i>salt-splitting</i> por peso de resina seca	37
XVII.	Parámetros de control para determinar la capacidad de <i>salt-splitting</i> por mililitro de material sedimentado y retrolavado	37
XVIII.	Parámetros de control para determinar el porcentaje de regeneración de la capacidad de <i>salt-splitting</i> de la resina	38
XIX.	Parámetros de control para determinar el porcentaje de regeneración de la capacidad total de intercambio iónico de la resina.....	39
XX.	Arreglo rectangular para tratamientos con tres réplicas	40

XXI.	Capacidad total de intercambio iónico de la resina inicial obtenida mediante la sulfonación del poliestireno expandido.....	43
XXII.	Determinación de las características de la resina obtenida mediante la sulfonación del poliestireno expandido	43
XXIII.	Porcentaje de disminución en la capacidad total de intercambio iónico de la resina ante la deshidratación y rehidratación.....	47

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Capacidad de partición de una sal neutra por masa de resina húmeda (meq/g)
I	Capacidad de partición de una sal neutra por masa de resina seca (meq/g)
J	Capacidad de partición de una sal neutra por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)
C_w	Capacidad total de intercambio iónico por masa húmeda de la resina (meq/g)
C_d	Capacidad total de intercambio iónico por masa seca de la resina (meq/g)
C_b	Capacidad total de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)
F	Densidad de retrolavado promedio (g/mL)
A	Masa de la muestra (g)
C	Masa de la muestra húmeda (g)
D	Masa de la muestra seca (g)
W	Masa de la resina húmeda (g)
N_A	Normalidad de la solución de HCl (mol-eq/L)
N_B	Normalidad de la solución de NaOH (mol-eq/L)
R	Número de rehidratación de la resina
M	Porcentaje de retención máxima de agua promedio
S_o	Precisión de ensayo
S_T	Precisión global de la evaluación

x	Valor promedio
G	Volumen de titulación con HCl (mL)
E	Volumen de titulación con NaOH (mL)
B	Volumen total de la resina retrolavada (mL)

GLOSARIO

Adim.	Adimensional.
Const.	Constante.
Hidratación	Incorporación de agua a un compuesto.
Intercambio iónico	Operación de separación que involucra la transferencia de iones de una fase fluida a una sólida, por desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales.
Poliestireno	Polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno monómero.
Poliestireno expandido	Material derivado del poliestireno, plástico y espumado.
PS	Poliestireno.
PSE	Poliestireno expandido.
<i>Salt-splitting</i>	Partición de una sal neutra.

Sulfonación

Procedimiento por el cual se introduce el grupo sulfónico a un átomo de carbono o de nitrógeno, para obtener el ácido sulfónico correspondiente.

Var.

Variable.

RESUMEN

La investigación consistió en la evaluación del proceso de rehidratación de una resina de intercambio iónico, elaborada a partir de la sulfonación y entrecruzamiento de la matriz polimérica de poliestireno expandido, utilizado en empaques y embalaje, para determinar si existe una disminución significativa en su capacidad de intercambio iónico.

Se realizó una evaluación primaria a la resina, determinando los parámetros establecidos en la Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), para caracterizarla, creando un parámetro de comparación entre la resina inicial y la rehidratada. Asimismo, estas propiedades se compararon con los parámetros establecidos para la resina comercial, Purofine PFC-100, determinando que la resina elaborada presenta características similares a esta.

Fueron realizados tres procesos de deshidratación y rehidratación consecutivos, evaluando entre cada proceso la capacidad total de intercambio iónico y estableciendo el porcentaje de disminución de la misma. Finalmente, se determinó que para todas las deshidrataciones el porcentaje de disminución de las propiedades de intercambio fue menor al uno por ciento. Recomendando como límite máximo óptimo, tres deshidrataciones por resina.

OBJETIVOS

General

Evaluar el proceso de rehidratación de una resina de intercambio iónico elaborada a partir de poliestireno expandido reciclado, determinando si existe una disminución significativa en su capacidad total de intercambio iónico.

Específicos

1. Determinar la capacidad total de intercambio iónico de la resina inicial obtenida mediante la sulfonación del poliestireno expandido.
2. Establecer el comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico de la resina rehidratada respecto a la inicial.
3. Determinar el porcentaje de disminución en la capacidad total de intercambio iónico de la resina ante la deshidratación y rehidratación.
4. Comparar las características de una resina de intercambio iónico elaborada a partir de la sulfonación del poliestireno expandido de origen reciclado, respecto a la resina de poliestireno sulfonado comercial Purofine PFC-100.

5. Determinar la densidad de retrolavado, retención máxima de agua y capacidad de fraccionamiento de una sal neutra de la resina obtenida mediante la sulfonación y entrecruzamiento de la matriz polimérica del poliestireno expandido.

Hipótesis

Hipótesis estadística

La media aritmética de la capacidad total de intercambio iónico de la resina de poliestireno sulfonado comercial Purofine PFC-100, es mayor que la de la resina elaborada con poliestireno expandido de origen reciclado.

Hipótesis correlacional

La capacidad total de intercambio iónico de la resina disminuye en un diez por ciento en cada regeneración.

Hipótesis de investigación

Es posible realizar el procedimiento de deshidratación y rehidratación de una resina obtenida a partir de la sulfonación de poliestireno expandido de origen reciclado, sin que exista pérdida significativa en la capacidad de intercambio iónico.

Hipótesis nula

No es posible realizar el procedimiento de deshidratación y rehidratación de una resina obtenida a partir de la sulfonación de poliestireno expandido de origen reciclado, sin que exista pérdida significativa en la capacidad de intercambio iónico.

INTRODUCCIÓN

Las resinas de intercambio iónico son cadenas tridimensionales de hidrocarburos, a las cuales se han adicionado grupos ionizables, a través de procesos de sulfonación, aminación o análogos; resultando de ellos resinas intercambiadoras catiónicas y aniónicas.

Al someter los residuos de poliestireno expandido a un proceso de sulfonación y entrecruzamiento de su matriz polimérica, se logra ligar grupos sulfónicos y sulfonas a la unidad monomérica del estireno. Esto provee un carácter hidrofílico y capacidad de intercambio iónico al material obtenido. Obteniendo así, una alternativa al reciclaje del poliestireno expandido, generando un intercambiador catiónico de bajo consumo energético y bajo costo.

En este proceso, se obtiene como resultado, una resina compuesta, en su mayoría, por agua. Esto representa una dificultad en el manejo de la resina. Por lo que, se considera de suma importancia, la evaluación del proceso de deshidratación y rehidratación de la resina. Así como, la regeneración de sus principales propiedades, determinando si existe pérdida significativa en su capacidad total de intercambio iónico.

La Norma ASTM D2187 – 94 hace referencia a métodos de evaluación que cubren la determinación de las propiedades físicas y químicas, de resinas de intercambio iónico usadas en tratamiento de agua. Estos métodos están destinados a la evaluación de material nuevo y regenerado, por lo que permiten

determinar la disminución en la capacidad de intercambio de la resina debido al proceso de hidratación y rehidratación.

1. ANTECEDENTES

En 2005, se llevó a cabo en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, para la Facultad de Química e Ingeniería Química, un trabajo de investigación con el tema *Síntesis de un intercambiador catiónico a partir de poliestireno comercial/residual*, por los investigadores Cjuno, et al. En donde se expone el procedimiento para la obtención de la resina de intercambio iónico a partir de la pirólisis del poliestireno expandido para la obtención del monómero, el cual es posteriormente polimerizado y sulfonado. En este trabajo se concluye que las microesferas obtenidas del copolímero (PS-DVB) sulfonado, presentan características similares a las de la resina comercial de intercambio catiónico fuertemente ácida Sybron Chemicals Inc. Ionac ® C-249.

En 2012, se realizó un trabajo de graduación, por el investigador Oscar Giovanni Córdova Recinos, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, para la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería con el tema *Elaboración de una resina de intercambio iónico a partir de la sulfonación y entrecruzamiento de poliestireno expandido reciclado para la separación de iones metálicos en solución*, el cual muestra el mecanismo para la modificación del poliestireno expandido reciclado y la obtención de la resina de intercambio iónico, así como las pruebas realizadas al material obtenido. En este estudio se llegó a la conclusión que la mejor opción del proceso de sulfonación del poliestireno, con base en el desempeño en las pruebas físicas, químicas y visuales realizadas, es el tratamiento al diez por ciento con ácido sulfúrico fumante y dos horas de reacción.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Poliestireno (PS)

El poliestireno es un polímero vinílico, que estructuralmente, está formado por una cadena larga hidrocarbonada, con un grupo fenilo unido cada dos átomos de carbono. Este se produce por una polimerización vinílica, por radicales libres a partir del monómero estireno.

Figura 1. **Polimerización vinílica por radicales libres del estireno**



Fuente: Universidad del Sur de Mississippi. *Polystyrene*.

<http://www.pslc.ws/spanish/styrene.htm>. Consulta: abril de 2014.

2.1.1. Propiedades del poliestireno

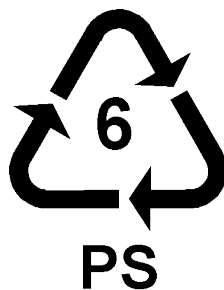
Además de los enlaces covalentes que mantienen unidas las moléculas de los monómeros, se producen otras interacciones intermoleculares e intramoleculares que influyen notablemente en las propiedades físicas del polímero. El poliestireno, en general, posee elasticidad, cierta resistencia al

ataque químico, buena resistencia mecánica, térmica y eléctrica y baja densidad.

Debido a que, el poliestireno es un polímero termoplástico, las fuerzas intermoleculares son muy débiles y al calentarse las cadenas pueden moverse unas con relación a otras y el polímero puede moldearse. Cuando el polímero se enfría vuelven a establecerse las fuerzas intermoleculares pero entre átomos diferentes, con lo que cambia la ordenación de las cadenas. El poliestireno es un sólido vítreo por debajo de 100 °C; por encima de esta temperatura es procesable y puede dársele múltiples formas.

El PS es un polímero amorfo por lo general, soluble en muchos disolventes orgánicos y relativamente estable al ataque químico. La cadena principal es la del polietileno, en la que de cada dos unidades (CH₂) una lleva un anillo aromático sustituyente, lo que le confiere carácter amorfo y su peculiar reactividad.

Figura 2. **Identificación del poliestireno según código de identificación de plásticos**



Fuente: CAÑAMERO, A. *El poliestireno*. <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/Rc-38/RC-38.htm>. Consulta: abril de 2014.

2.2. Poliestireno expandido (EPS)

El poliestireno expandido es un material plástico celular y rígido, fabricado a partir del moldeo de perlas preexpandidas de poliestireno expandible o uno de sus copolímeros, que presenta una estructura celular cerrada y rellena de aire.

2.2.1. Propiedades del poliestireno expandido

El poliestireno expandido presenta propiedades físicas y mecánicas características.

2.2.1.1. Densidad

Los productos y artículos terminados en poliestireno expandido se caracterizan por ser extraordinariamente ligeros aunque resistentes. En función de la aplicación, las densidades se sitúan en el intervalo que va desde los 10 hasta los 35 kg/m³.

2.2.1.2. Color

Debido a la refracción de la luz, generalmente, es de color blanco.

2.2.1.3. Aislamiento térmico

Los productos y materiales de poliestireno expandido presentan una excelente capacidad de aislamiento térmico. Por lo que, muchas de sus aplicaciones, están directamente relacionadas con esta propiedad. Por ejemplo, cuando se utiliza como material aislante de los diferentes cerramientos de los

edificios o en el campo del envase y embalaje de alimentos frescos y perecederos como las cajas de pescado.

Esta buena capacidad de aislamiento térmico se debe a la propia estructura del material, que esencialmente consiste en aire ocluido dentro de una estructura celular conformada por el poliestireno. Aproximadamente un 98 % del volumen del material es aire y únicamente un 2 % materia sólida (poliestireno), siendo el aire en reposo es un excelente aislante térmico.

La capacidad de aislamiento térmico de un material está definida por su coeficiente de conductividad térmica que en el caso de los productos de EPS varía, al igual que las propiedades mecánicas, con la densidad aparente.

2.2.1.4. Comportamiento frente al agua y vapor de agua

El poliestireno expandido no es higroscópico, a diferencia de lo que sucede con otros materiales del sector del aislamiento y embalaje. Incluso sumergiendo el material completamente en agua los niveles de absorción son mínimos con valores oscilando entre el 1 y el 3 % en volumen (ensayo por inmersión después de 28 días).

Al contrario de lo que sucede con el agua en estado líquido, el vapor de agua sí puede difundirse en el interior de la estructura celular del EPS, cuando entre ambos lados del material se establece un gradiente de presiones y temperaturas.

2.2.1.5. Estabilidad unidad

Los productos de EPS, como todos los materiales, están sometidos a variaciones unidades debidas a la influencia térmica. Estas variaciones se evalúan a través del coeficiente de dilatación térmica que, para los productos de EPS, es independiente de la densidad y se sitúa en los valores que oscilan en el intervalo $5-7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, es decir entre 0,05 y 0,07 mm por metro de longitud y grado Kelvin.

2.2.1.6. Estabilidad frente a la temperatura

El rango de temperaturas en el que este material puede utilizarse con total seguridad, sin que sus propiedades se vean afectadas, no tiene limitación alguna por el extremo inferior (excepto las variaciones Unidades por contracción); respecto al extremo superior el límite de temperaturas de uso se sitúa alrededor de los 100 °C para acciones de corta duración y alrededor de los 80 °C para acciones continuas y con el material sometido a una carga de 20 kPa.

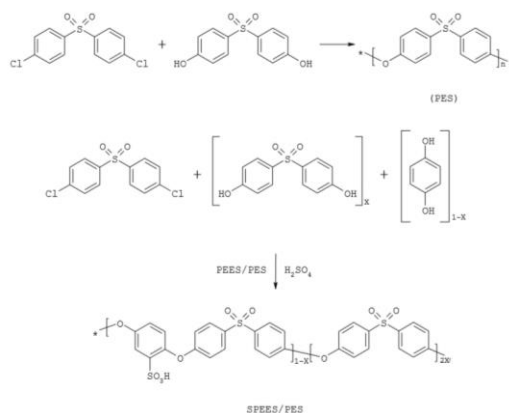
2.2.1.7. Comportamiento frente a factores atmosféricos

La radiación ultravioleta es el único factor que reviste importancia. Bajo la acción prolongada de la luz UV, la superficie del EPS se torna amarillenta y se vuelve frágil, de manera que la lluvia y el viento logran erosionarla. Dichos efectos pueden evitarse con medidas sencillas, en las aplicaciones de construcción con pinturas, revestimientos y recubrimientos.

2.3. Sulfonación del poliestireno

El proceso de sulfonación homogénea del poliestireno se puede visualizar en dos reacciones químicas. La síntesis de un copolímero sulfonable controlable desde dos monómeros y la sulfonación en ácido sulfúrico concentrado, en la posición orto en residuos de hidroquinona enlazados con el grupo etersulfona en el copolímero. La degradación de la sulfonación es controlada por la cantidad de hidroquinona que se agrega en la solución. La forma ácida del polímero sulfonado puede ser convertido en su forma de sal, haciéndolo reaccionar con una solución concentrada de hidróxido de sodio.

Figura 3. **Reacción química en la formación de poliestireno sulfonado**

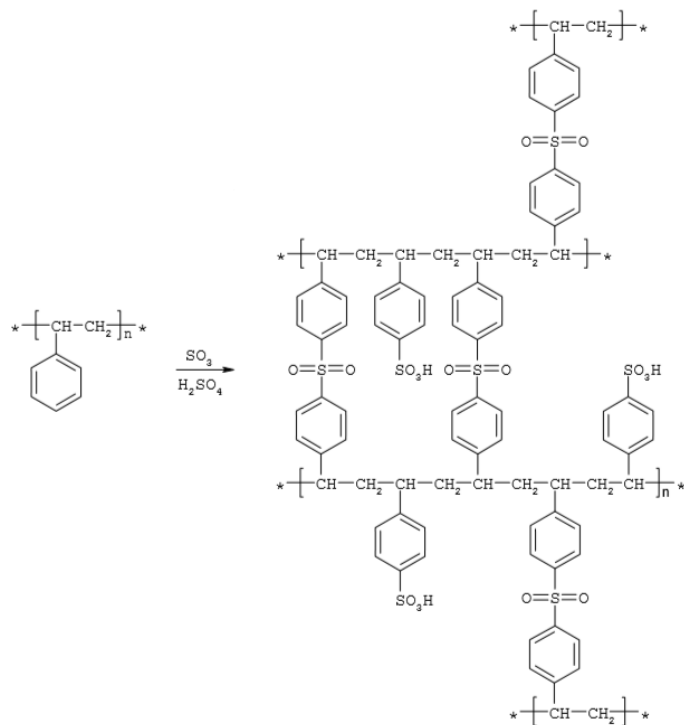


Fuente: LEÓN, et al. *Aplicaciones del PS sulfonado entrecruzado*. Revista Iberoamericana de Polímeros. Volumen 8 (2), marzo de 2007.

Con el objetivo de disponer de una matriz polimérica sulfonada y con una sustitución variable, se procede a la preparación del PS sulfonado entrecruzado. Esta matriz polimérica se lleva a cabo con residuos de PS con una solución de óleum, que consiste en ácido sulfúrico con trióxido de azufre (SO₃) al 33 %, todo esto a temperatura ambiente ya que permite llevarse a

cabo el entrecruzamiento entre el anillo aromático del PS y el grupo sulfona (-SO₂-), pero permite a la vez formar grupos sulfónicos (-SO₃H) provenientes de la no formación del entrecruzamiento entre las sulfona y el anillo aromático del PS.

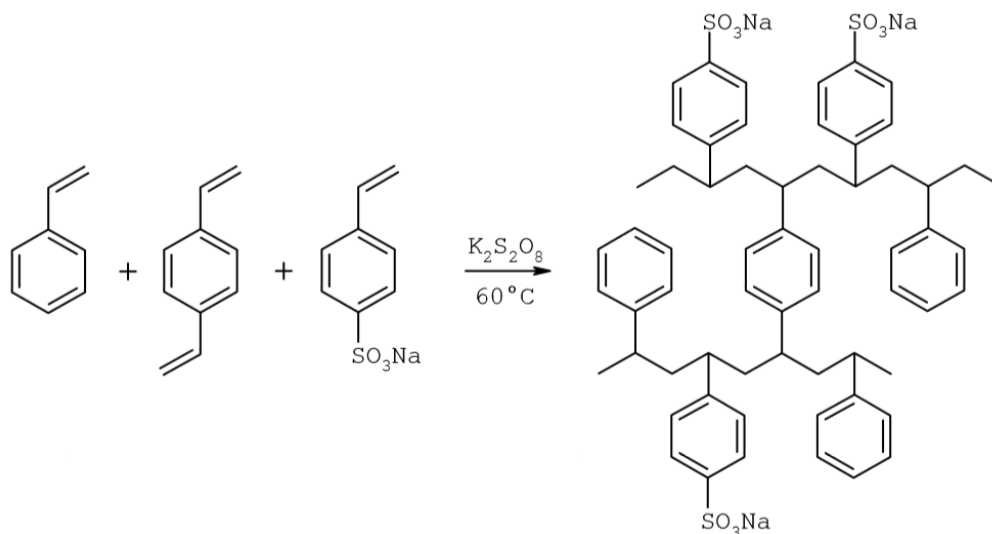
Figura 4. **Reacción entre PS y óleum para la formación de PS sulfonado entrecruzado**



Fuente: LEÓN, et al. *Aplicaciones del PS sulfonado entrecruzado*. Revista Iberoamericana de Polímeros. Volumen 8 (2), marzo de 2007.

Existen partículas de PS entrecruzado que cuentan con muchas aplicaciones como en columnas de intercambio iónico, celdas de membranas y catálisis. Estas partículas son creadas a partir del entrecruzamiento entre divinilbenceno y PS sulfonado de sodio.

Figura 5. **Estructura molecular del polímero entrecruzado entre el estireno, divinilbenceno y el estireno sulfonado de sodio**



Fuente: LEÓN, et al. *Aplicaciones del PS sulfonado entrecruzado*. Revista Iberoamericana de Polímeros. Volumen 8 (2), marzo de 2007.

Algunas resinas se encuentran en su forma ácida, que actúan de forma catalítica a base de copolímeros de PS-divinilbenceno sulfonado. Estas se basan en la medición de adsorción de amoníaco (NH₃) para caracterizar la acidez superficial en general y en particular, sitios ácidos accesibles.

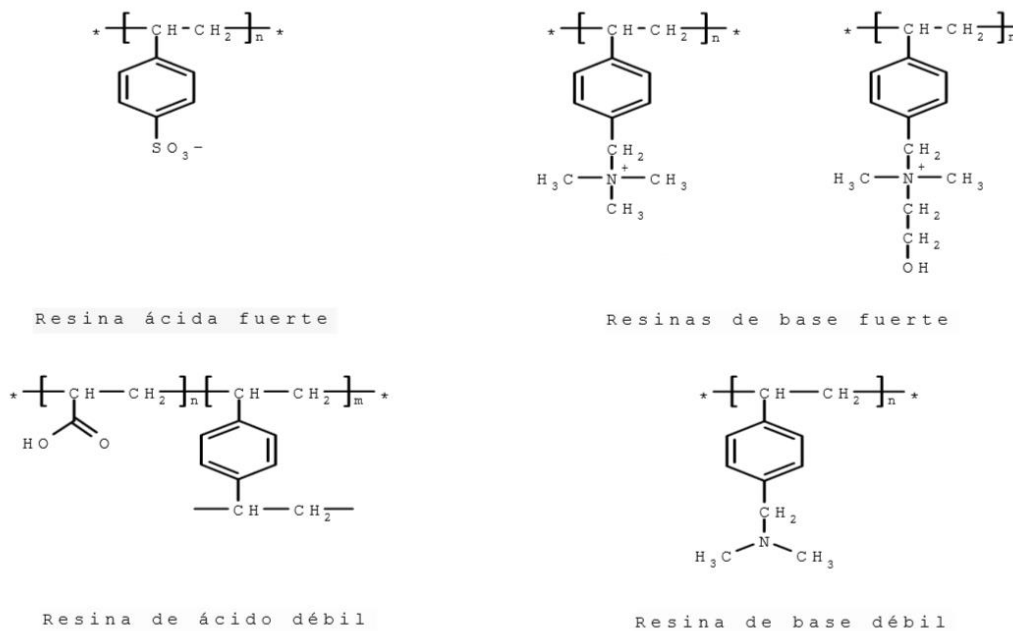
2.3.1. **Aplicación del PS sulfonado entrecruzado como intercambiador de iones**

Las resinas sintéticas de intercambio iónico, consisten en una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante y derivada con grupos inorgánicos que actúan como grupos funcionales.

El desarrollo de las resinas sintéticas comenzó con la síntesis de las mismas, mediante polimerización por condensación (fenol-formaldehído, epíclorhidrina-amina) y, posteriormente, se sintetizaron mediante polimerización por adición. La mayoría de las resinas comerciales están basadas en la estructura estireno-divinilbenceno, debido a su buena resistencia química y física y a su estabilidad en todo el intervalo de pH y a la temperatura. También se emplean matrices poliméricas basadas en el ácido acrílico o metacrílico.

Las resinas de intercambio de cationes contienen grupos ácidos, mientras que las resinas de intercambio de aniones tienen grupos básicos. Los intercambiadores de tipo ácido fuerte tienen grupos de ácido sulfónico ($-\text{SO}_3\text{H}$) unidos a la matriz del polímero y tienen mayor aplicación que los intercambiadores de tipo de ácido débil, cuya acción se debe a los grupos ácido carboxílico ($-\text{COOH}$). De manera parecida, los intercambiadores de aniones de tipo base fuerte contienen grupos de aminas cuaternarias [$-\text{N}(\text{CH}_3)_3+\text{OH}-$], mientras que los del tipo de base débil contienen aminas secundarias o terciarias.

Figura 6. **Estructuras moleculares de algunos polímeros sintéticos que tienen aplicación en el intercambio iónico**



Fuente: LEÓN, et al. *Aplicaciones del PS sulfonado entrecruzado*. Revista Iberoamericana de Polímeros. Volumen 8 (2), marzo de 2007.

Estas son redes tridimensionales de polímeros orgánicos insolubles a la que se adhieren grupos funcionales, los cuales son el origen de sus propiedades de intercambio iónico. La carga de los iones intercambiables solubles se equilibra con una carga igual, pero de signo contrario, que está sobre la red; aunque los iones intercambiables son solubles en agua, no pueden eliminarse de la resina a menos que sean sustituidos por un número equivalente de iones cargados de forma semejante.

El intercambio iónico es una reacción química en la que los iones libres móviles de un sólido (el intercambiador de iones), se cambian por distintos iones de carga similar de una disolución. El intercambiador debe tener una estructura de malla abierta, ya sea orgánica o inorgánica, que retenga los iones

sobre sí y que permita el paso a través de otros iones. Los intercambiadores de iones son compuestos orgánicos o inorgánicos, naturales o sintéticos. Entre los más utilizados actualmente se encuentran las resinas de intercambio iónico.

Las resinas de intercambio iónico se utilizan para eliminar iones que de otra forma podrían interferir con un análisis. Otra valiosa aplicación de las resinas de intercambio iónico comprende la concentración de iones a partir de una solución muy diluida. Así, a partir de grandes cantidades de aguas naturales se pueden recolectar trazas de elementos metálicos, sobre una columna de intercambio catiónico y posteriormente liberarse de la resina por tratamiento con un volumen pequeño de una solución ácida; el resultado es una solución más concentrada, para el análisis.

El objetivo principal de preparar el poliestireno sulfonado entrecruzado, es emplearlo como resina de intercambio iónico, ya que, no todo el poliestireno se encuentra entrecruzado y, por consiguiente, quedan grupos sulfónicos libres que sirven de intercambiadores para atrapar metales provenientes de efluentes acuosos. El protón que se encuentra libre permite intercambiar el metal que se encuentra disuelto en el efluente acuoso y retenerlo, para así disminuir la concentración del metal que se desea.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para el desarrollo de la investigación es necesaria la definición de las variables y parámetros de estudio, para cada una de las etapas del proyecto.

El proyecto comprende las siguientes etapas:

- Reciclaje y pre tratamiento del poliestireno expandido.
- Sulfonación de la matriz polimérica y elaboración de la sal sódica de la resina de intercambio iónico.
- Evaluación primaria de la resina de intercambio iónico.
- Deshidratación y rehidratación de la resina.
- Evaluación secundaria de la resina de intercambio iónico.

A continuación se muestra el análisis de las variables y parámetros presentes en cada procedimiento involucrado en la investigación.

Tabla I. **VARIABLES PRESENTES EN EL PROCESO DE DESGASIFICACIÓN DE PSE**

Nombre	Unidad	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Const.	Var.		
Proporción de acetona en la mezcla	Adim.	X		Controlable	Porcentaje de acetona en la mezcla.
Tiempo de desgasificación	min		X	No controlable	Tiempo que tarda el PSE en liberar el gas contenido.
Tiempo de secado	min	X		Controlable	Tiempo de secado de la muestra.
Temperatura de secado	°C	X		Controlable	Temperatura del horno en el proceso de secado.
Masa inicial	g	X		Controlable	Masa de polímero a desgasificar.
Masa final	g		X	No controlable	Masa del polímero desgasificado resultante.

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Variables presentes en el proceso de sulfonación del PS y elaboración de la sal sódica de la resina**

Nombre	Unidad	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Const.	Var.		
Tiempo de sulfonación	h	X		Controlable	Tiempo necesario para obtener cierto grado de sustitución.
Masa inicial	g	X		Controlable	Cantidad de polímero a sulfonar.
Proporción de ácido concentrado	Adim.	X		Controlable	Proporción de ácido sulfúrico concentrado respecto a la cantidad de polímero.
Proporción de ácido fumante	Adim.	X		Controlable	Proporción de óleum respecto a la cantidad de polímero.
Velocidad de agitación	rpm	X		Controlable	Velocidad de agitación de la mezcla.
Masa de polímero sulfonado	g		X	No controlable	Masa del polímero sulfonado resultante.

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variables presentes en el proceso de evaluación de la densidad de retrolavado de la resina**

Nombre	Unidad	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Const.	Var.		
Masa	g	X		Controlable	Masa de la muestra de la resina.
Volumen total	mL		X	No Controlable	Volumen de la muestra.
Volumen de agua	mL	X		Controlable	Volumen de agua agregado a la resina.

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Variables presentes en el proceso de evaluación de la capacidad máxima de retención de agua de la resina**

Nombre	Unidad	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Const.	Var.		
Masa inicial de la resina húmeda	g	X		Controlable	Masa de la resina antes de la prueba.
Masa de la resina seca	g		X	No Controlable	Masa de la resina después de la prueba.

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Variables presentes en el proceso de evaluación de la capacidad total de intercambio iónico de la resina**

Nombre	Unidad	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Const.	Var.		
Masa inicial de la resina húmeda.	g	X		Controlable	Masa de la resina antes de la prueba.
Normalidad de la solución de NaOH/NaCl.	(mol eq/L)	X		Controlable	Concentración de la solución de NaOH/NaCl.
Volumen de valoración con solución de HCl.	mL		X	No controlable	Volumen de HCl gastado en la valoración.
Normalidad de la solución de HCl.	(mol eq/L)	X		Controlable	Concentración de la solución de HCl.
Capacidad total de intercambio por gramo húmedo.	(meq/g)		X	No controlable	Capacidad total de intercambio iónico por gramo húmedo.
Porcentaje de agua retenida promedio.	Adim.		X	No controlable	Porcentaje de agua retenida en la muestra.
Capacidad total de intercambio por gramo seco.	(meq/g)		X	No controlable	Capacidad total de intercambio iónico por gramo seco.
Densidad promedio.	(g/mL)		X	No controlable	Densidad promedio de la muestra.
Capacidad total de intercambio por mililitro de retrolavado.	(meq/g)		X	No controlable	Capacidad total de intercambio iónico por mililitro de retrolavado.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Variables presentes en el proceso de evaluación de la capacidad de *salt-splitting* de la resina**

Nombre	Unidad	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Const.	Var.		
Masa inicial de la resina húmeda.	g	X		Controlable	Masa de la resina antes de la prueba.
Normalidad de la solución de NaOH.	(mol eq/L)	X		Controlable	Concentración de la solución de NaOH.
Volumen de valoración con solución de NaOH.	mL		X	No controlable	Volumen de NaOH gastado en la valoración.
Capacidad de <i>salt-splitting</i> por gramo húmedo.	(meq/g)		X	No controlable	Capacidad de <i>salt-splitting</i> por gramo húmedo.
Porcentaje de agua retenida promedio.	Adim.		X	No controlable	Porcentaje de agua retenida en la muestra.
Capacidad de <i>salt-splitting</i> por gramo seco.	(meq/g)		X	No controlable	Capacidad de <i>salt-splitting</i> por gramo seco.
Densidad promedio.	(g/mL)		X	No controlable	Densidad promedio de la muestra.
Capacidad de <i>salt-splitting</i> por mililitro de retrolavado.	(meq/g)		X	No controlable	Capacidad de <i>salt-splitting</i> por mililitro de retrolavado.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Variables presentes en el proceso de evaluación de la capacidad de regeneración de la resina**

Nombre	Unidad	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Const.	Var.		
Masa inicial de la resina húmeda.	g	X		Controlable	Masa de la resina antes de la prueba.
Normalidad de la solución de NaOH/NaCl.	(mol eq/L)	X		Controlable	Concentración de la solución de NaOH/NaCl.
Volumen de valoración con solución de HCl.	(mL)		X	No controlable	Volumen de HCl gastado en la valoración.
Normalidad de la solución de HCl.	(mol eq/L)	X		Controlable	Concentración de la solución de HCl.
Capacidad total de intercambio por gramo húmedo.	(meq/g)		X	No controlable	Capacidad total de intercambio iónico por gramo húmedo.
Normalidad de la solución de NaOH.	(mol eq/L)	X		Controlable	Concentración de la solución de NaOH.
Volumen de valoración con solución de NaOH.	(mL)		X	No controlable	Volumen de NaOH gastado en la valoración.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Campo de estudio: desechos sólidos, síntesis química, operaciones unitarias de transferencia de masa, intercambio iónico.
- Etapas que conforman la investigación:
 - Reciclaje y pre tratamiento del poliestireno expandido.
 - Sulfonación de la matriz polimérica y elaboración de la sal sódica de la resina de intercambio iónico.
 - Evaluación primaria de la resina de intercambio iónico.
 - Deshidratación y rehidratación de la resina.
 - Evaluación secundaria de la resina de intercambio iónico.
- Material de estudio: residuos de poliestireno expandido proveniente de las cajas de desecho del *kit* de la prueba de DQO del Proyecto Fodecyt 47-2009, desechos provenientes del material de embalaje de dos televisores Samsung y perlas de poliestireno expandido virgen utilizadas en embalaje y empaque.
- Material de control de la investigación: iones metálicos en solución. Capacidad de intercambio iónico de la resina y su regeneración.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Karen Aracely Gatica Solares
- Asesora:
Ingeniera Química
Casta Petrona Zeceña
Colegiado Núm. 624
- Coasesor:
Ingeniero Químico
Óscar Giovanni Córdova Recinos
Colegiado Núm. 2003

3.4. Recursos materiales disponibles

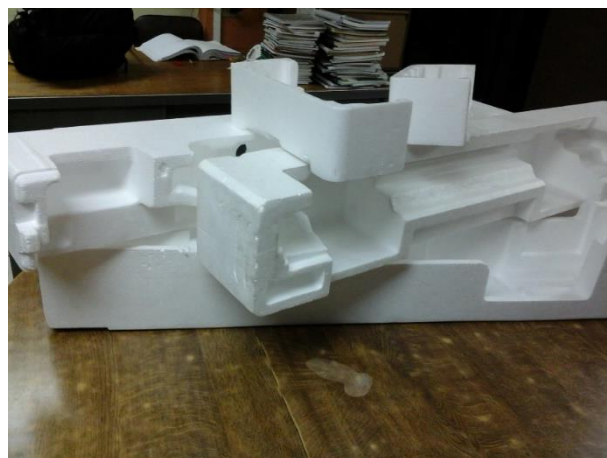
- Material a reciclar
 - Residuos de poliestireno expandido

Figura 7. **Cajas del *kit* de pruebas de DQO**



Fuente: Laboratorio de química industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería,
Usac.

Figura 8. **Material de empaque de televisores Samsung**



Fuente: Laboratorio de química industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería,
Usac.

3.4.1. Reactivos

- Acetona
- Ácido clorhídrico
- Ácido sulfúrico concentrado
- Agua desmineralizada
- Cloruro de sodio (grado reactivo)
- Hidróxido de sodio
- Indicador de fenolftaleína
- Indicador de naranja de metilo
- Óleum (ácido que contiene trióxido de azufre en ácido sulfúrico)

3.4.2. Cristalería e instrumentos de medición

- Equipo de destilación:
 - Balones de fondo esmerilado
 - Condensador de serpentín
 - Codos conectores
- Agitadores magnéticos
- Ampolla de decantación
- Balón aforado
- *Beaker*
- Bureta
- Columna de vidrio
- Cronómetro
- *Erlenmeyer* de boca esmerilado
- Embudo *butchner*

- Kitasato
- Matraz *erlenmeyer*
- Perilla de succión
- Pipeta serológica
- Pipeta volumétrica
- Probeta
- Tamiz
- Tapones de hule
- Termómetro
- Varilla de vidrio
- Vidrio de reloj
- Medidor de pH

3.4.3. Equipo

- Bomba de vacío
- Campana de extracción
- Desecador
- Horno de secado por convección
- Plancha de agitación magnética
- Tamices de diferentes diámetros
- Tamizadora de bandejas

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

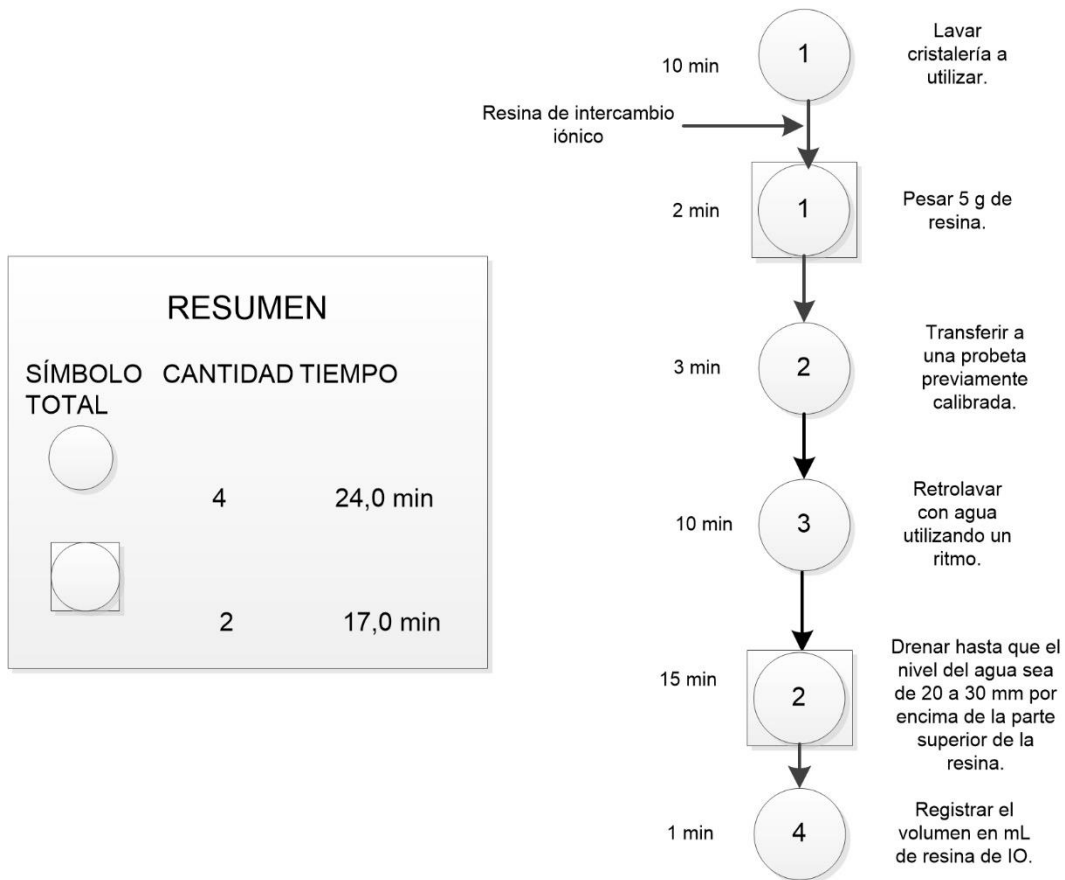
Se evaluarán las propiedades físicas visibles de la resina original y de la resina regenerada, utilizando técnicas cualitativas. Se determinará si existen cambios durante el proceso de deshidratación y rehidratación. En esta etapa se definirá la calidad de superficie, uniformidad en el color, consistencia y forma del material.

Asimismo, se realizará una evaluación de las propiedades de la resina, utilizando como técnica cuantitativa, los parámetros establecidos en la Norma ASTM D 2187 – 94 (2004). Se determinará la densidad de retrolavado, retención máxima de agua, capacidad de fraccionamiento de una sal neutra y capacidad total de intercambio iónico de la resina, así como, la capacidad de regeneración de estas propiedades al momento de su rehidratación.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

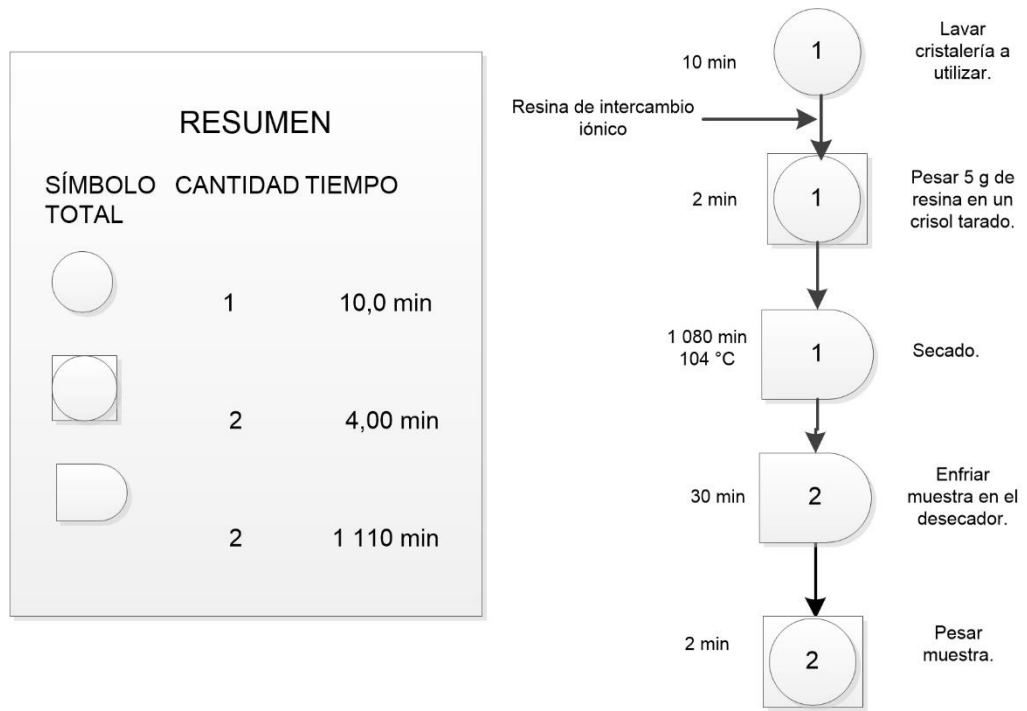
La evaluación de la resina de intercambio iónico tiene como objetivo determinar las propiedades físicas y químicas del material original y regenerado. Con base en la Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), que hace mención a métodos estándar de evaluación de las propiedades físicas y químicas de resinas de intercambio iónico de partículas, se evaluará, la densidad de retrolavado, retención máxima de agua, capacidad de fraccionamiento de una sal neutra y capacidad total de intercambio iónico.

Figura 9. **Densidad de retrolavado, según Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), sección 18-2**



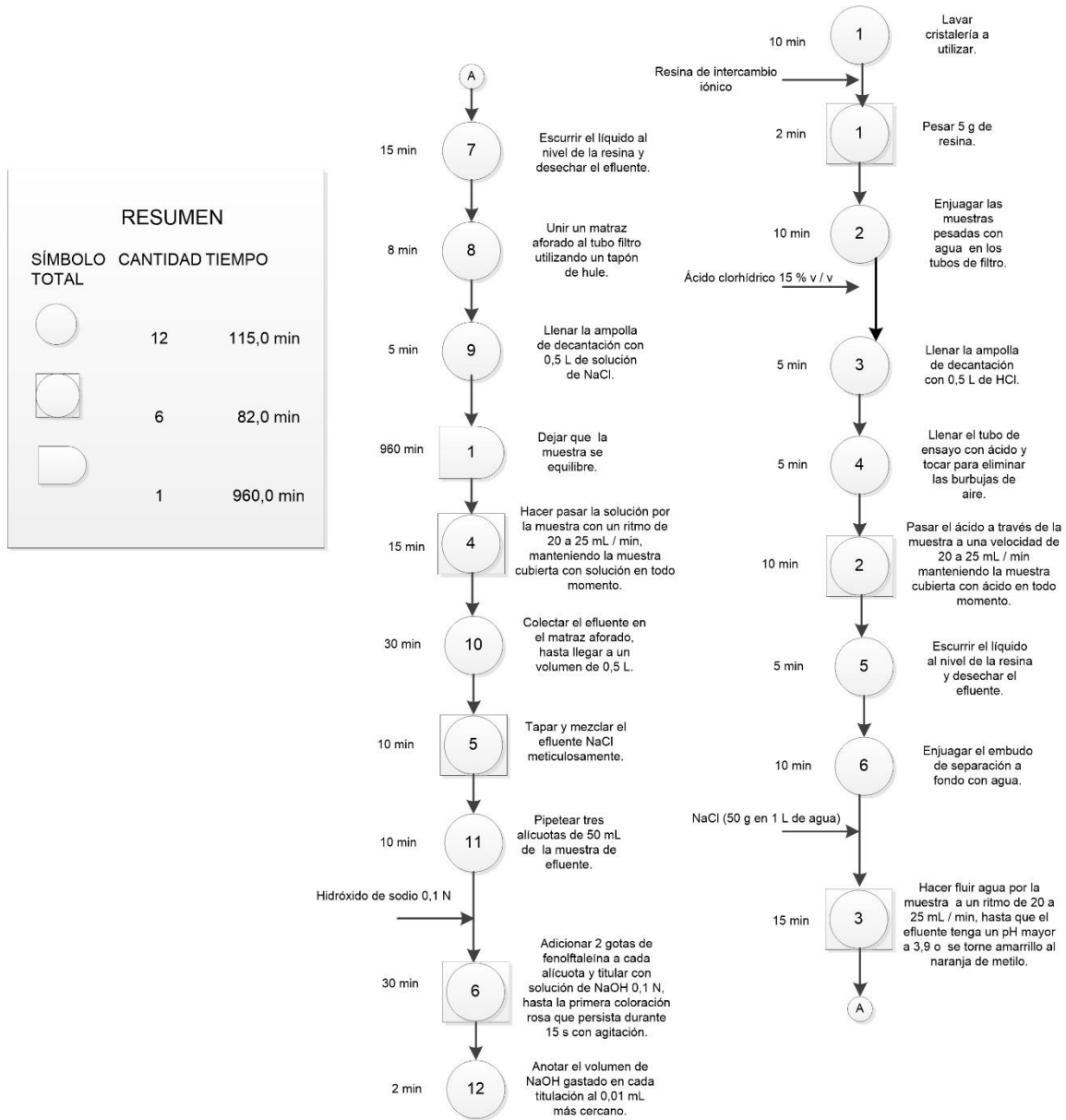
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Retención máxima de agua según Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), sección 11-17**



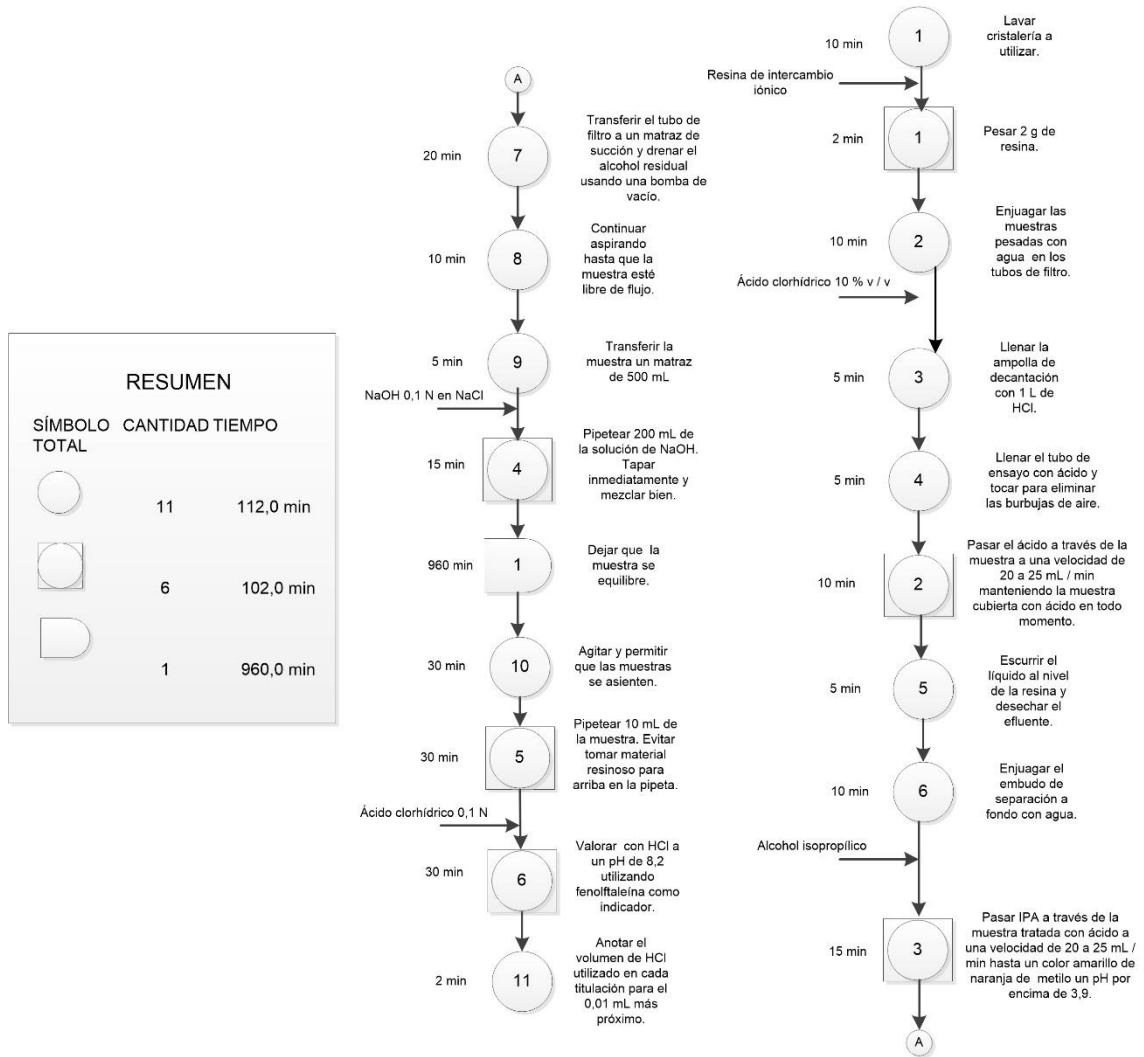
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Capacidad de fraccionamiento de una sal neutra, según Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), sección 33-41**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Capacidad total de intercambio iónico, según Norma ASTM D 2187 – 94 (2004), sección 42-50



Fuente: elaboración propia.

3.6.1. Porcentaje de regeneración de la capacidad de fraccionamiento de una sal neutra

Procedimiento:

- Utilizando las mismas muestras empleadas en la evaluación de la capacidad de fraccionamiento de una sal neutra de la resina, descrita en la figura 9, repetir el procedimiento para dicha prueba.
- Anotar el volumen de NaOH gastado en cada una de las segundas titulaciones al 0,01 mL más cercano.

3.6.2. Porcentaje de regeneración de la capacidad total de intercambio iónico

Procedimiento:

- Utilizando las mismas muestras empleadas en la evaluación de la capacidad total de intercambio iónico, descrita en la figura 9, repetir el procedimiento para dicha prueba.
- Anotar el volumen de HCl gastado en cada una de las segundas titulaciones al 0,01 mL más cercano.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación se muestran las tablas que serán utilizadas para el control y recolección de datos en las distintas etapas del proyecto.

Tabla VIII. **Parámetros de control desgasificación de poliestireno expandido**

Núm. de muestra	Masa inicial (g) (poliestireno expandido)	Tiempo de desgasificación (min)	Masa final (g) (poliestireno desgasificado)
1 (Embalaje televisor)			
2 (Embalaje equipo Fodecyt)			
3 (Perlas)			

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Parámetros de control sulfonación del poliestireno y elaboración de la sal sódica de la resina**

Núm. de muestra	Masa inicial (g) (poliestireno desgasificado)	Masa final (g) (resina)
1		
2		
3		

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Parámetros de control para determinar la densidad de la resina de poliestireno

Núm. de muestra	Masa muestra húmeda (g)	Volumen de agua agregado (mL)	Volumen total (mL)	Densidad (g/mL)	Densidad promedio (g/mL)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Parámetros de control para determinar la capacidad máxima de retención de agua

Núm. de muestra	Masa muestra húmeda (g)	Masa vidrio de reloj (g)	Masa después de secado (g)	Masa muestra seca (g)	Porcentaje de agua retenida (%)	Porcentaje de agua retenida promedio (%)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Parámetros de control para determinar la capacidad total de intercambio iónico por peso de resina húmeda**

Núm. de muestra	Masa de resina húmeda (g)	Normalidad de la solución de NaOH/NaCl (mol eq/L)	Volumen de valoración con solución de HCl (mL)	Normalidad de la solución de HCl (mol eq/L)	Capacidad total de intercambio por gramo húmedo (meq/g)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Parámetros de control para determinar la capacidad total de intercambio iónico por peso de resina seca**

Núm. de muestra	Porcentaje de agua retenida promedio (%)	Capacidad total de intercambio por gramo húmedo (meq/g)	Capacidad total de intercambio por gramo seco (meq/g)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Parámetros de control para determinar la capacidad total de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado**

Núm. de muestra	Densidad promedio (g/mL)	Capacidad total de intercambio por gramo húmedo (meq/g)	Capacidad total de intercambio por mililitro de retrolavado (meq/mL)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Parámetros de control para determinar la capacidad de *salt-splitting* por peso de resina húmeda**

Núm. de muestra	Masa de resina húmeda (g)	Normalidad de la solución de NaOH (mol eq/L)	Volumen de titulación con NaOH (mL)	Volumen promedio de titulación con NaOH (mL)	Capacidad de <i>salt-splitting</i> por gramo húmedo (meq/g)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Parámetros de control para determinar la capacidad de *salt-splitting* por peso de resina seca**

Núm. de muestra	Porcentaje de agua retenida promedio (%)	Capacidad de <i>salt-splitting</i> por gramo húmedo (meq/g)	Capacidad de <i>salt-splitting</i> por gramo seco (meq/g)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Parámetros de control para determinar la capacidad de *salt-splitting* por mililitro de material sedimentado y retrolavado**

Núm. de muestra	Densidad promedio (g/mL)	Capacidad de <i>salt-splitting</i> por gramo húmedo (meq/g)	Capacidad de <i>salt-splitting</i> por mililitro de retrolavado (meq/mL)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Parámetros de control para determinar el porcentaje de regeneración de la capacidad de *salt-splitting* de la resina**

Núm. de muestra	Volumen de titulación con NaOH (mL) (1)	Normalidad de la solución de NaOH (mol eq/L) (1)	Volumen de titulación con NaOH (mL) (2)	Normalidad de la solución de NaOH (mol eq/L) (2)	Porcentaje de regeneración de la capacidad de <i>salt-splitting</i>
PROMEDIO					

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Parámetros de control para determinar el porcentaje de regeneración de la capacidad total de intercambio iónico de la resina**

Núm. de muestra	Masa de resina húmeda (g)	Normalidad de la solución de NaOH/NaCl (mol eq/L) (1)	Volumen de valoración con solución de HCl (mL) (1)	Normalidad de la solución de HCl (mol eq/L) (1)	Capacidad total de intercambio por gramo húmedo (meq/g) (1)
Núm. de muestra	Masa de resina húmeda (g) (2)	Normalidad de la solución de NaOH/NaCl (mol eq/L) (2)	Volumen de valoración con solución de HCl (mL) (2)	Normalidad de la solución de HCl (mol eq/L) (2)	Capacidad total de intercambio por gramo húmedo (meq/g) (2)
Porcentaje de regeneración de la capacidad total de intercambio iónico de la resina					

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

A continuación se detallan las secciones abordadas para el desarrollo del análisis estadístico de los resultados experimentales.

3.8.1. Diseño experimental

Se utilizará un modelo estadístico aleatorio con arreglo combinatorio, en el cual se aplicará una experimentación factorial evaluando 2 resinas obtenidas por la sulfonación del poliestireno y 3 regeneraciones de las mismas; con 3 repeticiones cada una, resultando 6 combinaciones experimentales y un total de 18 corridas o muestras a analizar.

Tabla XX. **Arreglo rectangular para tratamientos con tres réplicas**

		M = Resina de poliestireno sulfonado	
		M ₁	M ₂
R = Número de regeneración	R ₁	X ₁ Y ₁	X ₂ Y ₁
		X ₁ Y ₂	X ₂ Y ₂
		X ₁ Y ₃	X ₂ Y ₃
	R ₂	X ₁ Z ₁	X ₂ Z ₁
		X ₁ Z ₂	X ₂ Z ₂
		X ₁ Z ₃	X ₂ Z ₃
	R ₃	X ₁ W ₁	X ₂ W ₁
		X ₁ W ₂	X ₂ W ₂
		X ₁ W ₃	X ₂ W ₃

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos, se hará uso de las medidas de tendencia central y de dispersión, necesarias para representar los resultados.

3.8.2. Medidas de tendencia central

Con el objetivo de resumir los datos obtenidos en un valor representativo, se utilizan las siguientes medidas de tendencia central.

3.8.2.1. Media aritmética

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:¹

$$x_p = \frac{\sum x_i}{n}$$

3.8.3. Medidas de dispersión

Describen la cantidad de dispersión, o variabilidad que se encuentra entre los datos. El agrupamiento entre los datos indica una dispersión baja y viceversa.

¹ JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. p. 64.

3.8.3.1. Varianza

Es la media de las desviaciones (x) al cuadrado respecto a la media aritmética (x_p) de una distribución estadística.²

$$S^2 = \frac{\sum(x - x_p)^2}{n - 1}$$

Donde, n es el tamaño de la muestra.

3.8.3.2. Desviación estándar

La 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.³

$$S = \sqrt{S^2}$$

² JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. p. 66.

³ Op. Cit. p. 67.

4. RESULTADOS

Tabla XXI. **Capacidad total de intercambio iónico de la resina inicial obtenida mediante la sulfonación del poliestireno expandido**

Capacidad de intercambio iónico por masa de resina húmeda (meq/g)	9,716
Capacidad de intercambio iónico por masa de resina seca (meq/g)	149,253
Capacidad de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)	10,002

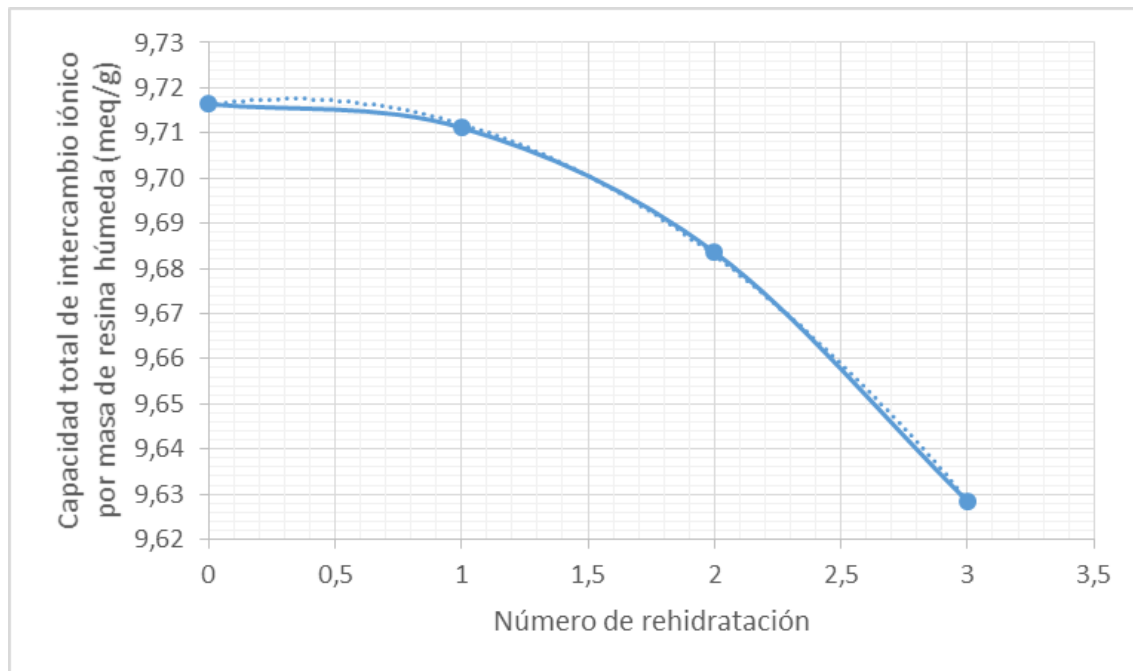
Fuente: anexos, datos calculados, tabla VI.

Tabla XXII. **Determinación de las características de la resina obtenida mediante la sulfonación del poliestireno expandido**

Densidad de retrolavado (g/mL)	1,03
Porcentaje de retención máxima de agua (%)	93,49
Capacidad de <i>salt-splitting</i> por masa de resina húmeda (meq/g)	0,137
Capacidad de <i>salt-splitting</i> por masa de resina seca (meq/g)	2,101
Capacidad de <i>salt-splitting</i> por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)	0,141

Fuente: anexos, datos calculados, tablas III a la V.

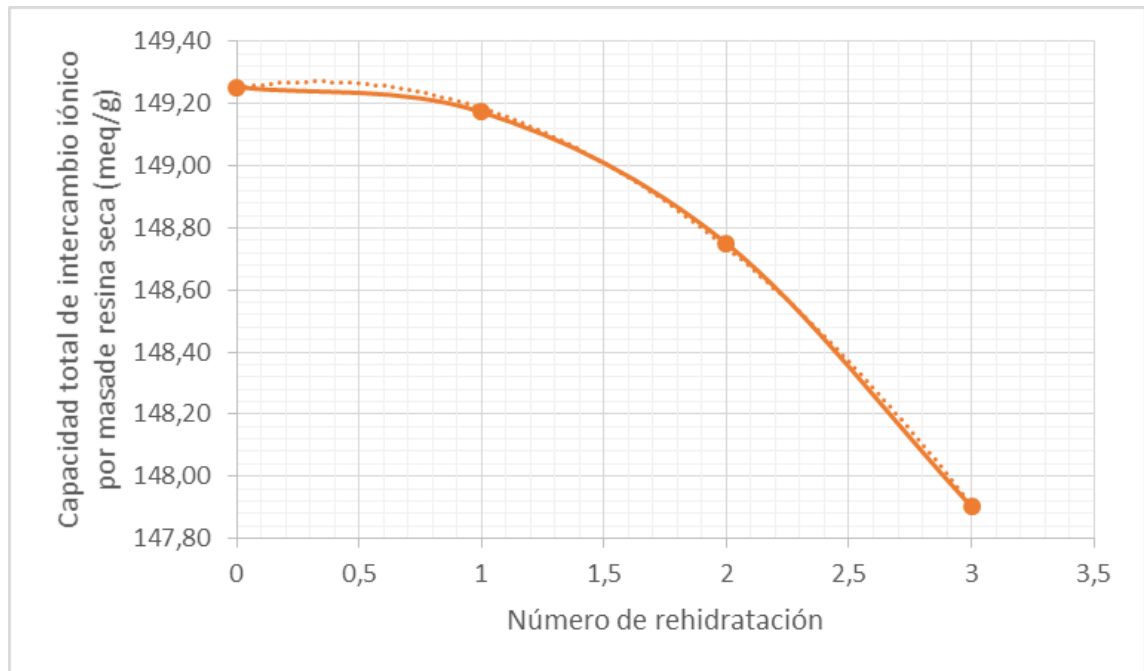
Figura 13. **Comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico por masa húmeda de la resina rehidratada respecto a la inicial**



Color	Modelo matemático	Coefficiente de correlación	Intervalo de validez
	$C_w = -0,0125R^2 + 0,0083R + 9,7161$	0,9997	[0,3] R

Fuente: anexos, datos calculados, tablas II, V, IX, XI, con Microsoft Excel 2013.

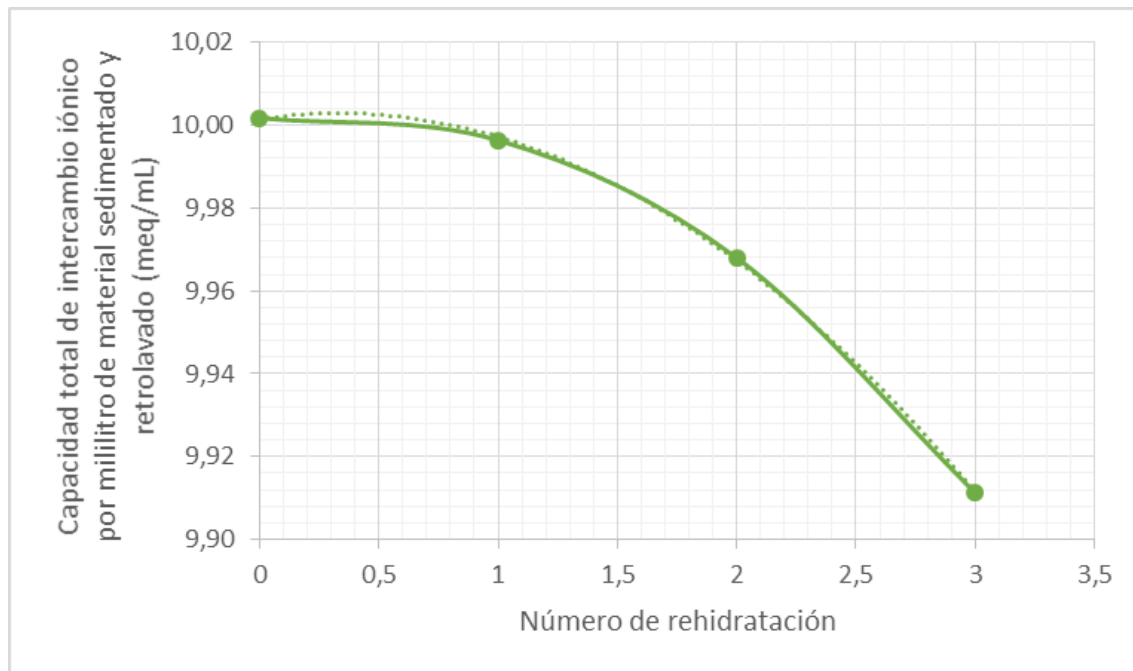
Figura 14. **Comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico por masa seca de la resina rehidratada respecto a la inicial**



Color	Modelo matemático	Coefficiente de correlación	Intervalo de validez
	$C_d = -0,192R^2 + 0,1281R + 149,25$	0,9997	[0,3] R

Fuente: anexos, datos calculados, tablas II, V, IX, XI, con Microsoft Excel 2013.

Figura 15. **Comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado de la resina rehidratada respecto a la inicial**



Color	Modelo matemático	Coefficiente de correlación	Intervalo de validez
	$C_b = -0,129R^2 + 0,0086R + 10,002$	0,9997	[0,3] R

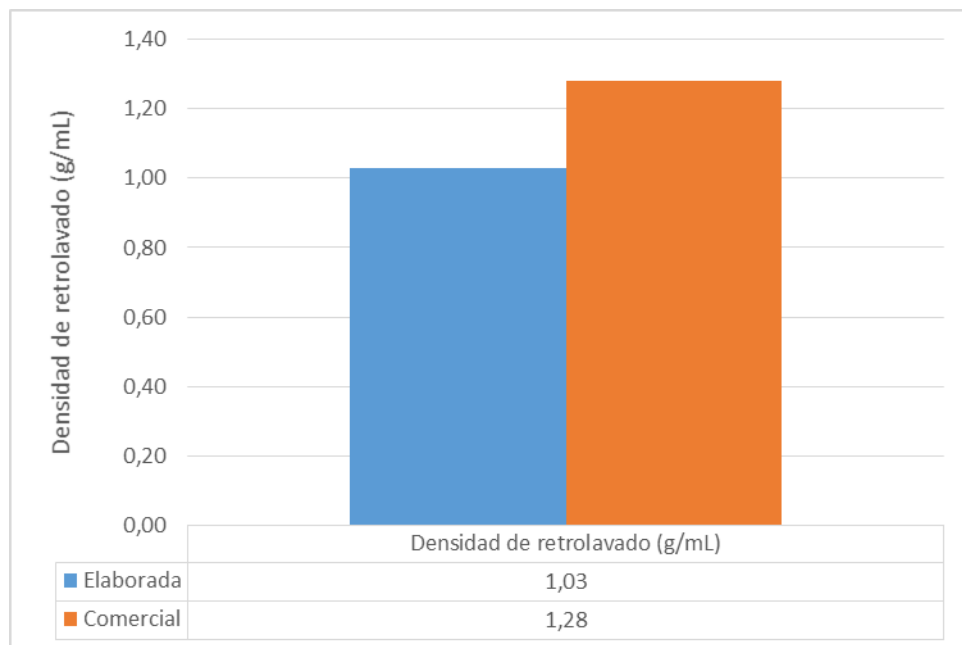
Fuente: anexos, datos calculados, tablas II, V, IX, XI, con Microsoft Excel 2013.

Tabla XXIII. **Porcentaje de disminución en la capacidad total de intercambio iónico de la resina ante la deshidratación y rehidratación**

Número de regeneración	Porcentaje de disminución
1	0,05%
2	0,34%
3	0,91%

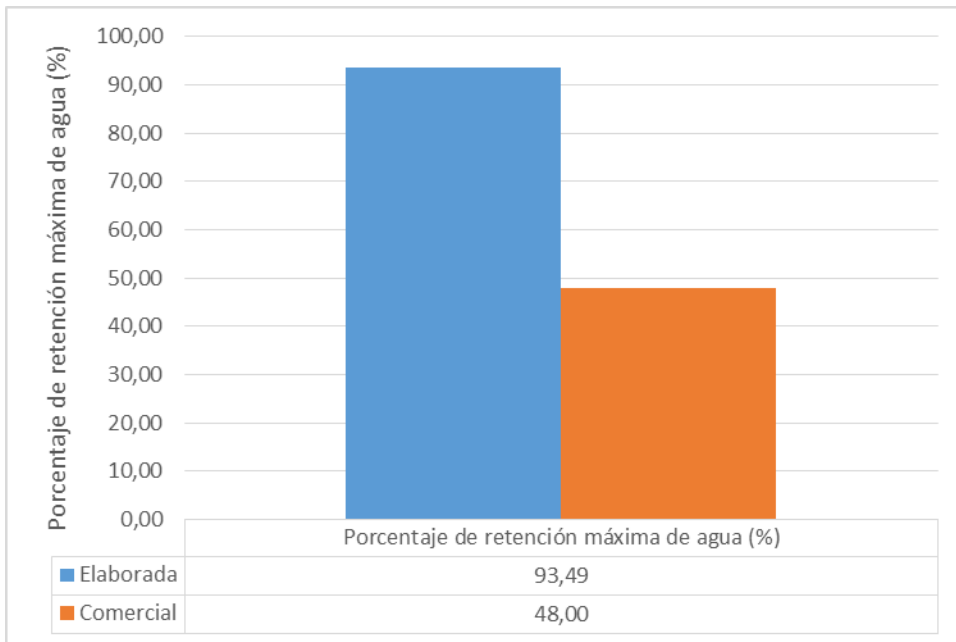
Fuente: anexos, datos calculados, tablas II, V, IX, XI.

Figura 16. **Comparación de la densidad de retrolavado de la resina de elaborada a partir de poliestireno expandido de origen reciclado, respecto a la resina comercial Purofine PFC-100**



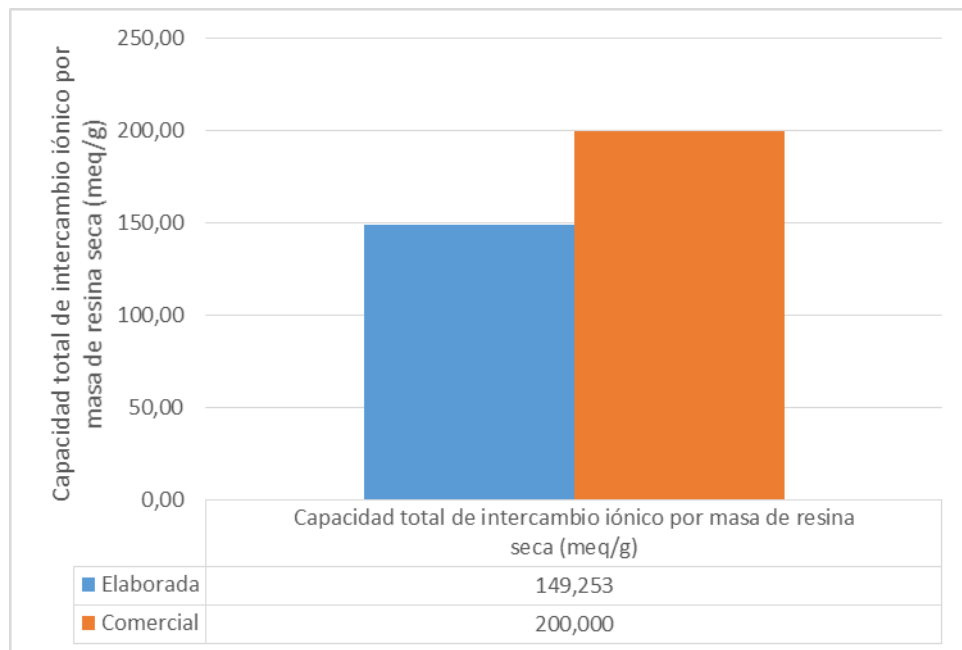
Fuente: anexos, datos calculados, tabla III, con Microsoft Excel 2013.

Figura 17. Comparación del porcentaje de retención máxima de agua de la resina de elaborada a partir de poliestireno expandido de origen reciclado, respecto a la resina comercial Purofine PFC-100



Fuente: anexos, datos calculados, tabla IV, con Microsoft Excel 2013.

Figura 18. **Comparación de la capacidad total de intercambio iónico de la resina de elaborada a partir de poliestireno expandido de origen reciclado, respecto a la resina comercial Puofine PFC-100**



Fuente: anexos, datos calculados, tabla V, con Microsoft Excel 2013.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el proceso de sulfonación y entrecruzamiento de la matriz polimérica del poliestireno expandido, se obtiene como resultado, una resina compuesta, en su mayoría, por agua. Esto representa una dificultad en el manejo de la resina y un incremento en el costo de la misma. Lo que disminuye su factibilidad económica y posibilidad de comercialización. Por esta razón, se considera de suma importancia, la evaluación del proceso de deshidratación y rehidratación de la resina.

La investigación se enfoca en la evaluación de una resina polimérica ácida fuerte, elaborada a partir de una mezcla de residuos de poliestireno expandido, provenientes de material para embalaje y empaque. Para determinar si existe una disminución significativa en la capacidad total de intercambio iónico de la misma, tras someterla al proceso de deshidratación y rehidratación.

Se aplicó un pre tratamiento al material utilizado para elaborar la resina, que consiste en la desgasificación del poliestireno expandido, con el propósito de reducir el volumen de las esferas y optimizar el espacio disponible para la sulfonación. Tras la desgasificación del material, se procedió a realizar la sulfonación del mismo, utilizando como agente sulfonante una mezcla de ácido sulfúrico fumante, óleum, en un diez por ciento y ácido sulfúrico concentrado en un noventa por ciento, aplicando dos horas de sulfonación; siguiendo las recomendaciones dadas en la investigación *Elaboración de una resina de intercambio iónico a partir de la sulfonación y entrecruzamiento de poliestireno expandido reciclado para la separación de iones metálicos en solución*, que estableció estos parámetros como óptimos para la elaboración de la resina.

El mecanismo de reacción de la sulfonación es una sustitución electrofílica aromática, dada a partir de la formación del electrófilo de trióxido de azufre. Posteriormente, se neutralizó el poliestireno sulfonado en su forma ácida, utilizando una solución de hidróxido de sodio, hasta llevar el potencial de hidrógeno de la mezcla a un valor mayor a diez. Obteniendo así, la sal sódica de la resina. Se realizaron lavados con agua desmineralizada para eliminar el exceso de ácidos que pudiesen estar libres en la misma.

La resina obtenida se presentó como un sistema coloidal con la fase continua sólida y la fase dispersa líquida. Este gel contenía esférulas de la sal sódica de la resina, en su mayoría uniformes; sin embargo, existía porciones del material, en las que no se obtuvo la separación adecuada para obtener las esférulas, dando lugar a la formación de coágulos en el coloide, que disminuyen el área superficial de contacto, dificultando el intercambio iónico.

La evaluación de la resina se orientó en la determinación de la capacidad total de intercambio iónico de la misma, y el efecto producido por el proceso de deshidratación y rehidratación. Para cumplir con este objetivo, se determinó la capacidad total de intercambio iónico de la resina inicial en miliequivalentes por gramo de resina húmeda, por gramo de resina seca y por mililitro de material sedimentado y retrolavado; estos resultados se muestran en la tabla XXI.

Con el objetivo de establecer un parámetro de comparación de la resina rehidratada respecto a la inicial, se realizó la caracterización de la resina elaborada con los parámetros establecidos como óptimos en la investigación precedente. Así, se determinó la densidad de retrolavado, la capacidad máxima de retención de agua y la capacidad de fraccionamiento de una sal neutra de la resina, para su caracterización, los resultados se muestran en la tabla XXII. La evaluación se realizó con base en los métodos descritos en la Norma ASTM D

2187 – 94 (2004), *Métodos estándar de evaluación de las propiedades físicas y químicas de resinas de intercambio iónico de partículas.*

Estas propiedades se compararon con la resina de poliestireno sulfonado comercial Purofine PFC-100, en las figuras 14, 15 y 16, se muestra el resultado de esta comparación. Tanto la densidad de retrolavado, como la capacidad total de intercambio iónico, figuras 14 y 16, son menores en la resina elaborada que en la comercial, esto se debe a que los coágulos presentes en el gel, disminuyen la densidad del retrolavado, ya que aumenta la cantidad de agua retenida en la red polimérica.

La capacidad de intercambio iónico disminuye debido a la disminución del área superficial de contacto de la resina con el medio de intercambio de iones. Esto corresponde con la hipótesis estadística planteada, que propone que la media aritmética de la capacidad total de intercambio iónico de la resina de poliestireno sulfonado comercial, es mayor que la de la resina elaborada con poliestireno expandido de origen reciclado. Se considera que la capacidad de intercambio iónico de la resina elaborada, sí cumple con los parámetros establecidos para una resina polimérica ácida fuertes en la norma antes mencionada.

La densidad de retrolavado determina la densidad del material en su máxima retención de agua, el valor de esta es mayor que la densidad promedio del agua a las condiciones en las que se realizó el experimento; esto favorece la circulación del material resinoso en el retrolavado, mejorando a su vez la regeneración de la resina. Se observa en la figura 15 que la retención máxima de agua, a diferencia de las otras propiedades, es mayor para la resina elaborada que para la comercial. Si la resina posee mayor cantidad de grupos sulfónicos aumenta la solubilidad del material y disminuye el porcentaje de

retención máxima de agua. Dado que la resina se elaboró a escala laboratorio, la sulfonación es más débil que la utilizada para la resina comercial; lo que genera una menor proporción de grupos sulfónicos presentes en la red polimérica.

Otra propiedad evaluada para la resina inicial, es la capacidad de partición de una sal neutra, esta determina el grado de intercambio de iones de sodio de la resina, a través del contacto con una sal sódica. Al igual que la capacidad total de intercambio iónico, esta propiedad se evaluó en miliequivalentes por gramo de material seco, por gramo de material húmedo y por mililitro de material sedimentado y retrolavado.

Tanto la capacidad de partición de una sal neutra, como la capacidad total de intercambio iónico de la resina, están relacionadas con la retención máxima de agua y la densidad de retrolavado de la misma. Por lo que, los factores que afecten estas características, tendrán incidencia directa en su capacidad de intercambiar iones. Al aumentar la densidad del material, disminuye el porcentaje de retención máxima de agua, esto favorece la operación de intercambio iónico, aumentando la capacidad de la resina.

En la figura 11, se modela el comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico por gramo húmedo de la resina rehidratada respecto a la inicial. Este modelo se ajusta a un comportamiento polinomial de segundo orden, que presenta un extremo máximo en la resina inicial y una tendencia decreciente al mínimo.

La figura 12, representa el comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico por gramo seco de la resina rehidratada respecto a la inicial. Al igual que el comportamiento de la capacidad total de intercambio iónico por

masa húmeda de la resina, este modelo se ajusta a un comportamiento polinomial de segundo orden, que presenta un extremo máximo en la resina inicial y una tendencia decreciente al mínimo. Para la capacidad total de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado, se obtuvo un comportamiento similar al de las dos capacidades de intercambio expuestas anteriormente, este se modela en la figura 13.

Fueron realizadas tres rehidrataciones de las muestras de la resina rehidratada, evaluando la capacidad total de intercambio iónico tras cada regeneración. Al deshidratar la resina, parte del agua queda retenida dentro de la red polimérica; debido a esto, al rehidratar el material no es posible reconstituir la estructura del polímero en su totalidad, generando la necesidad de aumentar la cantidad de agua en el medio disperso, para lograr la formación del coloide. Esto genera una disminución en la densidad y un aumento en el porcentaje de retención máxima de agua. Como se mencionó con anterioridad, al aumentar la densidad del material y disminuir el porcentaje de retención máxima de agua, se ve favorecido el intercambio iónico. Por lo que, al realizar el proceso inverso, la capacidad de intercambiar iones de la resina disminuye.

Se evaluó el porcentaje de disminución de la capacidad total de intercambio iónico en la resina debido a cada rehidratación. Este porcentaje de disminución es, para todos los casos, menor al uno por ciento, esto demuestra que la hipótesis de investigación planteada, que expone que es posible realizar el procedimiento de deshidratación y rehidratación de una resina obtenida a partir de la sulfonación de poliestireno expandido de origen reciclado, sin que exista pérdida significativa en la capacidad de intercambio iónico, es afirmativa. Asimismo, la hipótesis correlacional, que enuncia que la capacidad total de intercambio iónico de la resina disminuye en un diez por ciento en cada regeneración, ha sido comprobada.

6. CONCLUSIONES

1. La capacidad total de intercambio iónico por masa húmeda de la resina inicial obtenida mediante la sulfonación del poliestireno expandido es de 9,716 meq/g.
2. La capacidad total de intercambio iónico por masa seca de la resina inicial es de 149,253 meq/g.
3. La capacidad total de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado de la resina inicial es de 10,002 meq/g.
4. Los valores obtenidos para la capacidad total de intercambio iónico de la resina elaborada a partir de la sulfonación de poliestireno de origen reciclado, corresponden al valor promedio establecido en la Norma ASTM D 2187 – 94 (2004).
5. La capacidad total de intercambio iónico de la resina rehidratada presenta un comportamiento polinomial de segundo orden respecto a la inicial, que presenta un extremo máximo en la resina inicial y una tendencia decreciente al mínimo.
6. El porcentaje de disminución en la capacidad total de intercambio iónico de la resina ante la deshidratación y rehidratación es menor al uno por ciento, para la totalidad de ensayos realizados.

7. La densidad de retrolavado es menor para la resina de intercambio iónico elaborada a partir de la sulfonación del poliestireno expandido de origen reciclado, que para la resina de poliestireno sulfonado comercial Purofine PFC-100.
8. El intercambiador iónico elaborado posee menor proporción de grupos sulfónicos que el comercial, por ende, su capacidad de intercambiar iones es menor.
9. La resina elaborada presenta mayor porcentaje de retención máxima de agua, en comparación a la resina comercial evaluada.
10. La densidad de retrolavado media de la resina elaborada es de 1,03 g/mL.
11. La resina elaborada permite en promedio una retención máxima de agua del 93,49 %.
12. La capacidad de partición de una sal neutra por masa húmeda de la resina inicial obtenida mediante la sulfonación del poliestireno expandido es de 0,137 meq/g, por masa seca de la resina inicial es de 2,101 meq/g y por mililitro de material sedimentado y retrolavado es de 0,141 meq/g.

RECOMENDACIONES

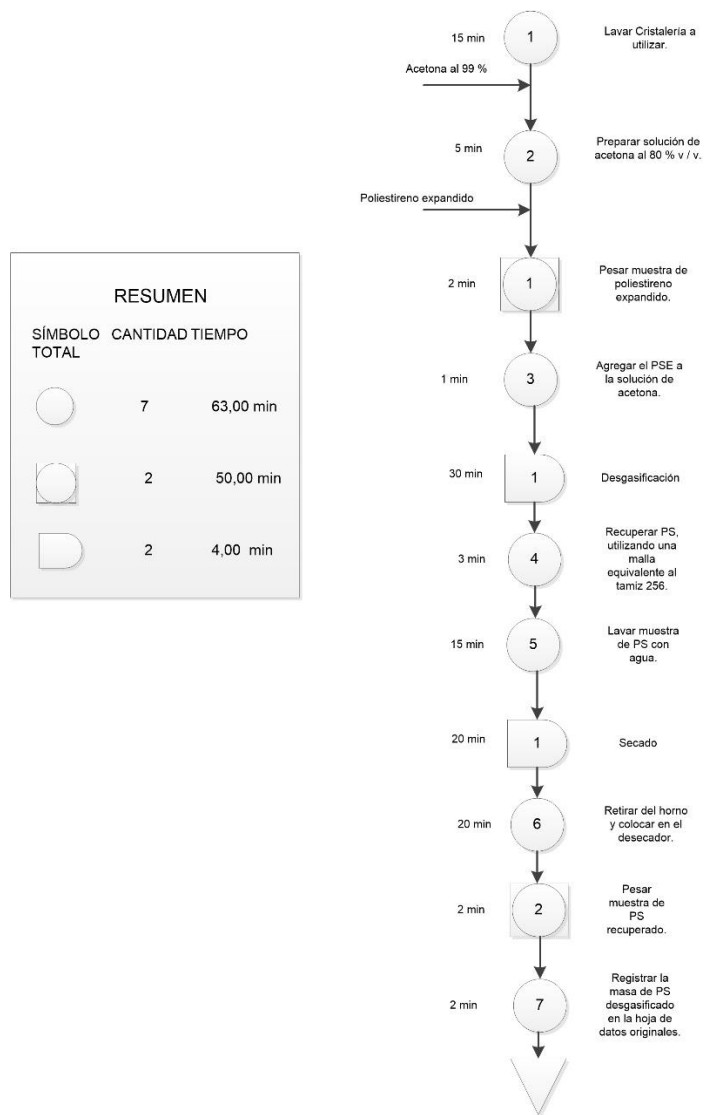
1. Establecer como límite de regeneración de la resina de intercambio iónico, tres deshidrataciones.
2. Verificar que la temperatura del proceso de deshidratación de la resina, no supere los 104 °C.
3. Evitar el fraccionamiento de esférulas al realizar el proceso de retrolavado, utilizando una columna que posea la altura correspondiente al volumen de resina a evaluar.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM International. *Standard Test Methods for Physical and Chemical Properties of Particulate Ion-Exchange Resins*. D 2187 – 94. USA: American National Standard, 2004. 19 p.
2. CAREY, Francis. *Química orgánica*. Velázquez, Jorge (trad). 6a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 1245 p. ISBN-10: 970-10-5610-8.
3. CJUNO, Américo; et al. *Síntesis de un intercambiador catiónico a partir de poliestireno comercial / residual*. Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, 2005. Vol. 8 Núm. 1.
4. CÓRDOVA RECINOS, Óscar Giovanni. *Elaboración de una resina de intercambio iónico a partir de la sulfonación y entrecruzamiento de poliestireno expandido reciclado para la separación de iones metálicos en solución*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 152 p.
5. LEÓN, Reynaldo; et al. *Síntesis caracterización y aplicación del PS entrecruzado a partir de residuos de PS*. Tijuana, México: Universidad Autónoma de Baja California Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería. Revista Iberoamericana de Polímeros. 2007. Vol. 8 Núm. 2.

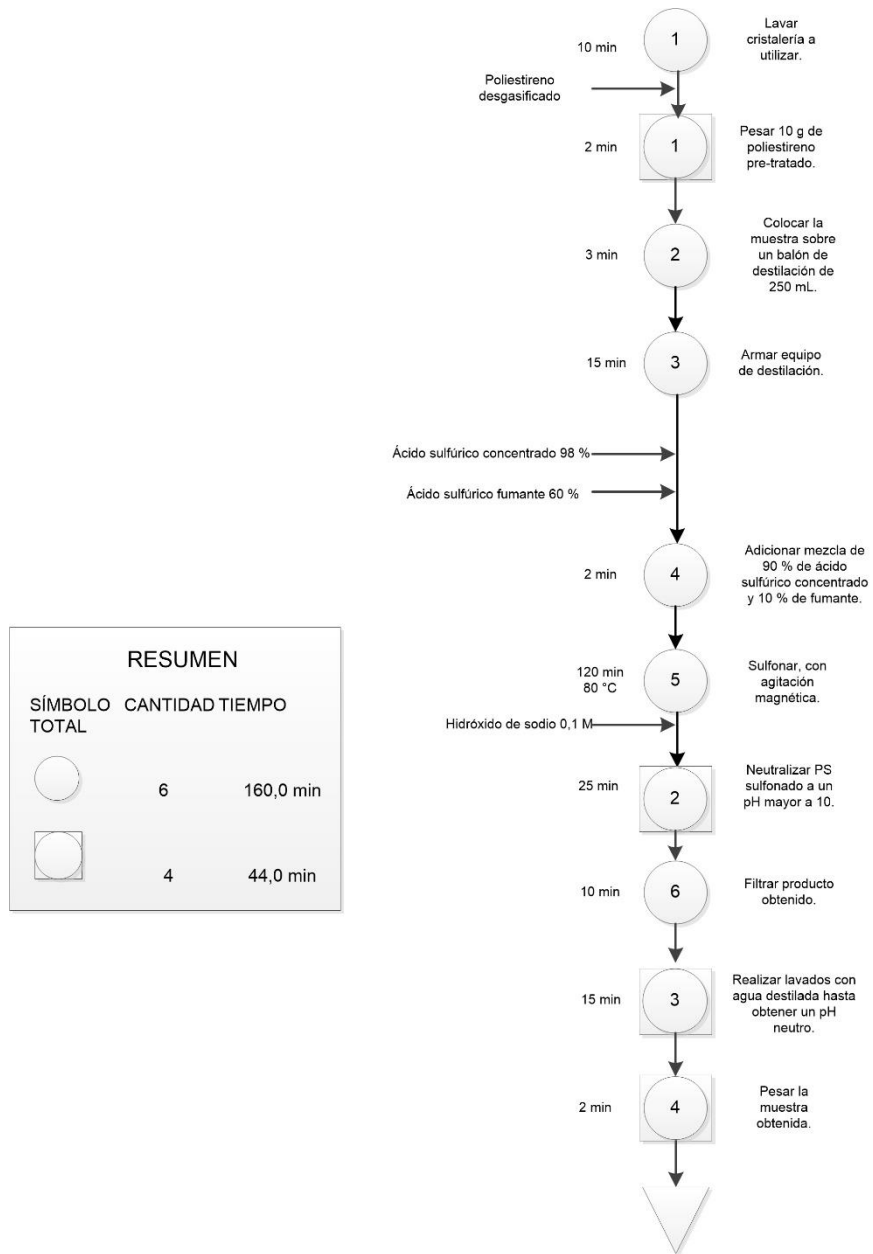
APÉNDICES

Figura 1. **Procedimiento desgasificación del poliestireno expandido (pretratamiento)**



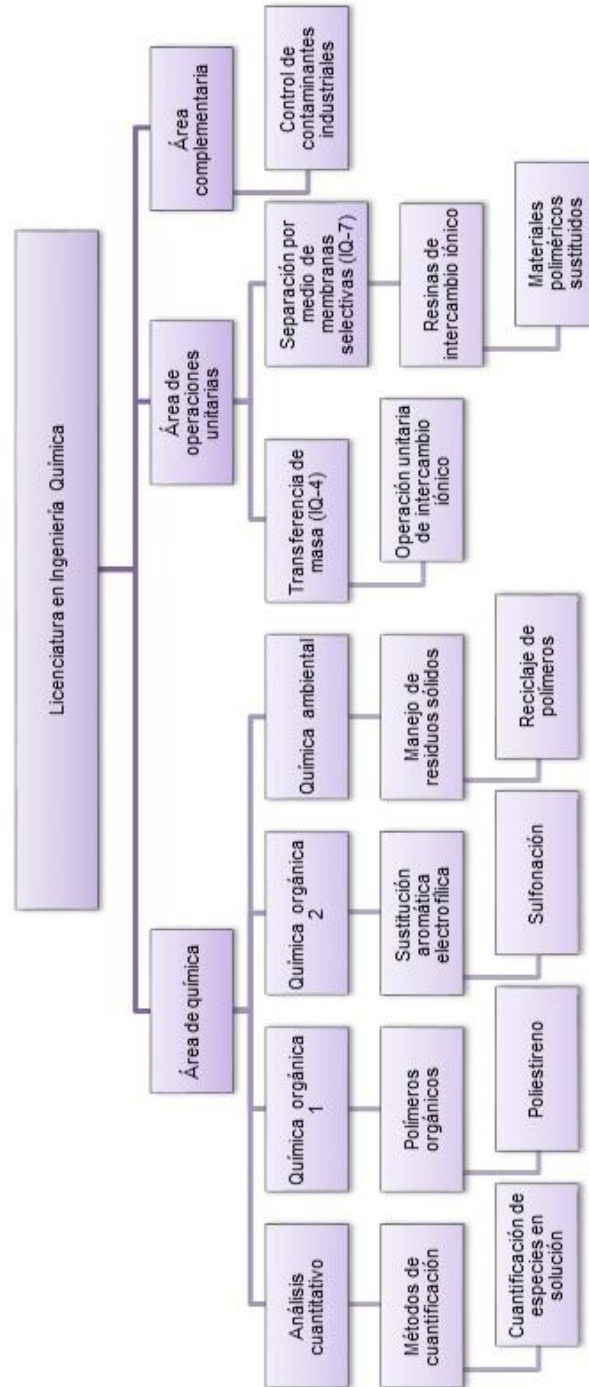
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Procedimiento “Sulfonación del poliestireno y elaboración de la sal sódica de la resina”**



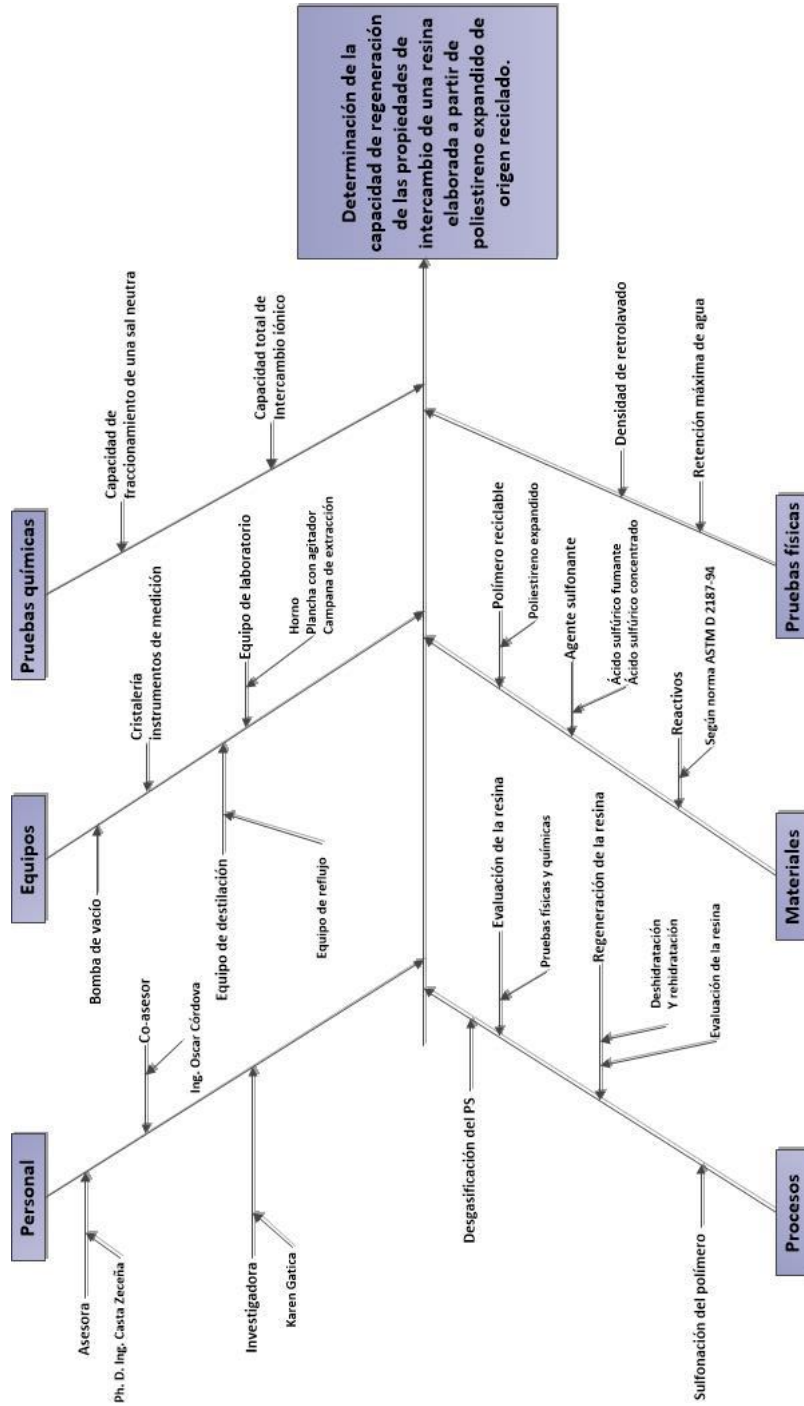
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de causa y efecto.



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

1. Muestra de cálculo

Densidad de retrolavado

Utilizada para calcular la densidad de retrolavado de la resina de intercambio iónico, en gramos por mililitro.

$$\text{densidad, } \frac{g}{mL} = \frac{A}{B} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Retención máxima de agua

Utilizada para calcular la capacidad máxima de retención de agua de la resina de intercambio iónico, en porcentaje.

$$\text{retención de agua, \%} = \left(\frac{C-D}{C} \right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Capacidad de *salt-splitting* por masa de resina húmeda

Utilizada para calcular la capacidad de partición de una sal neutra de la resina de intercambio iónico, en miliequivalentes por gramo de resina húmeda.

$$H \text{ (meq/g)} = \frac{(E \times N_B \times 10)}{W} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Capacidad de *salt-splitting* por masa de resina seca

Utilizada para calcular la capacidad de partición de una sal neutra de la resina de intercambio iónico, en miliequivalentes por gramo de resina seca.

$$I \text{ (}^{meq}/g\text{)} = \frac{H}{(1-(M/100))} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Capacidad de *salt-splitting* por mililitro de material sedimentado y retrolavado

Utilizada para calcular la capacidad de partición de una sal neutra de la resina de intercambio iónico, en miliequivalentes por mililitro de material retrolavado y sedimentado.

$$J \text{ (}^{meq}/mL\text{)} = H \times F \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Capacidad total de intercambio iónico por masa de resina húmeda

Utilizada para calcular la capacidad total de intercambio iónico de la resina de intercambio iónico, en miliequivalentes por gramo de resina húmeda.

$$C_w \text{ (}^{meq}/g\text{)} = \frac{(200 \times N_B) - (G \times N_A \times 4)}{W} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Capacidad total de intercambio iónico por masa de resina seca

Utilizada para calcular la capacidad total de intercambio iónico de la resina de intercambio iónico, en miliequivalentes por gramo de resina seca.

$$C_d (\text{meq/g}) = \frac{C_w}{(1-(M/100))} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Capacidad total de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado

Utilizada para calcular la capacidad total de intercambio iónico de la resina de intercambio iónico, en miliequivalentes por mililitro de material retrolavado y sedimentado.

$$C_b (\text{meq/mL}) = C_w \times F \quad (\text{Ecuación 8})$$

2. Análisis de error

Densidad de retrolavado, error por precisión

La precisión del método en la determinación de la densidad de retrolavado de la resina de intercambio iónico se expresa como:

$$S_T = 0,035 x \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$S_o = 0,005 x \quad (\text{Ecuación 10})$$

Retención máxima de agua, error por precisión

La precisión del método en la determinación del porcentaje de retención máxima de agua de retrolavado de la resina de intercambio iónico se expresa como:

$$S_T = 0,017 x \quad \text{(Ecuación 11)}$$

$$S_o = 0,004 x \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Capacidad de partición de una sal neutra, error por precisión

La precisión del método en la determinación de la capacidad de partición de una sal neutra de la resina de intercambio iónico se expresa como:

$$S_T = 0,075 x \quad \text{(Ecuación 13)}$$

$$S_o = 0,084 x \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Capacidad total de intercambio iónico, error por precisión

La precisión del método en la determinación de la capacidad de intercambio iónico total de la resina de intercambio iónico se expresa como:

$$S_T = 0,089 x \quad \text{(Ecuación 15)}$$

$$S_o = 0,029 x \quad \text{(Ecuación 16)}$$

3. Datos calculados

Tabla I. Evaluación de la densidad de retrolavado de la resina

Resina	Repetición	Masa (g)	Volumen de agua añadido (mL)	Volumen final (mL)	Densidad de retrolavado (g/mL)	Densidad promedio (g/mL)
1	1	5,03	5,00	9,90	1,03	1,02
	2	5,02	5,00	10,00	1,00	
	3	5,05	5,00	10,10	0,99	
	4	5,05	5,00	9,80	1,05	
	5	5,02	5,00	9,80	1,05	
2	1	5,01	5,00	9,50	1,11	1,07
	2	5,40	5,00	10,00	1,08	
	3	5,00	5,00	10,00	1,00	
	4	5,17	5,00	10,00	1,03	
	5	5,08	5,00	9,50	1,13	
3	1	3,16	5,00	8,00	1,05	1,02
	2	3,08	5,00	8,00	1,03	
	3	3,04	5,00	8,00	1,01	
	4	3,50	5,00	8,50	1,00	
	5	3,26	5,00	8,25	1,00	
4	1	5,02	5,00	10,00	1,00	1,00
	2	5,01	5,00	10,00	1,00	
	3	5,02	5,00	10,00	1,00	
	4	5,01	5,00	9,80	1,04	
	5	5,04	5,00	10,20	0,97	
5	1	5,26	5,00	10,00	1,05	1,03
	2	5,13	5,00	10,00	1,03	
	3	5,10	5,00	10,00	1,02	
	4	5,10	5,00	10,00	1,02	
	5	5,11	5,00	10,00	1,02	
PROMEDIO						1,03

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 1.

Tabla II. Evaluación porcentaje de agua retenida de la resina

Resina	Repetición	Tara crisol (g)	Resina Húmeda (g)	Masa final (g)	Resina seca (g)	Porcentaje de retención máxima de agua (%)	Porcentaje de retención promedio (%)
1	1	41,00	5,00	41,20	0,20	96,00	96,00
	2	32,20	5,00	32,40	0,20	96,00	
	3	39,70	5,00	39,90	0,20	96,00	
	4	37,20	5,00	37,40	0,20	96,00	
	5	20,40	5,00	20,60	0,20	96,00	
2	1	19,31	1,00	19,39	0,08	92,00	91,63
	2	23,29	1,00	23,38	0,09	91,00	
	3	21,08	1,00	21,16	0,08	92,00	
	4	21,22	1,01	21,30	0,08	92,08	
	5	31,56	1,01	31,65	0,09	91,09	
3	1	32,53	1,01	32,62	0,09	91,09	90,95
	2	36,62	1,01	36,71	0,09	91,09	
	3	31,29	1,03	31,38	0,09	91,26	
	4	30,98	1,05	31,08	0,10	90,48	
	5	31,28	1,09	31,38	0,10	90,83	
4	1	30,36	1,00	30,41	0,05	95,00	94,70
	2	30,44	1,02	30,49	0,05	95,10	
	3	31,91	1,03	31,96	0,05	95,15	
	4	31,14	1,29	31,21	0,07	94,57	
	5	31,73	1,11	31,80	0,07	93,69	
5	1	58,04	1,04	58,10	0,06	94,23	94,15
	2	43,75	1,10	43,84	0,09	91,82	
	3	50,09	1,20	50,13	0,04	96,67	
	4	106,67	1,29	106,75	0,08	93,80	
	5	58,04	1,04	58,10	0,06	94,23	
PROMEDIO							93,49

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 2.

Tabla III. Evaluación de la capacidad de partición de una sal neutra de la resina

Resina	Núm.	A (g)	Concentración de NaOH (N)	E (mL)	Por masa de resina húmeda (meq/g)	Por masa de resina seca (meq/g)	Por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)
1	1	5,01	0,10	0,70	0,140	2,146	0,144
	2	5,01	0,10	0,70	0,140	2,146	0,144
	3	5,01	0,10	0,50	0,100	1,533	0,103
	4	5,01	0,10	0,70	0,140	2,146	0,144
	5	5,01	0,10	0,50	0,100	1,533	0,103
2	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
3	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
4	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
5	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
PROMEDIO					0,137	2,101	0,141

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 3, 4 y 5.

Tabla IV. Evaluación de la capacidad total de intercambio iónico

Resina	Núm.	A (g)	Concentración de HCl (N)	G (mL)	C _w (meq/g)	C _d (meq/g)	C _b (meq/mL)
1	1	2,00	0,10	1,45	9,710	149,155	9,995
	2	2,00	0,10	1,45	9,710	149,155	9,995
	3	2,00	0,10	1,45	9,710	149,155	9,995
	4	2,00	0,10	1,45	9,710	149,155	9,995
	5	2,00	0,10	1,50	9,700	149,002	9,985
2	1	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	10,067
	2	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	10,067
	3	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	10,067
	4	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	10,067
	5	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	10,067
3	1	2,00	0,10	1,25	9,750	149,770	10,036
	2	2,00	0,10	1,20	9,760	149,923	10,047
	3	2,00	0,10	1,20	9,760	149,923	10,047
	4	2,00	0,10	1,25	9,750	149,770	10,036
	5	2,00	0,10	1,20	9,760	149,923	10,047
4	1	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
	2	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
	3	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
	4	2,00	0,10	1,60	9,680	148,694	9,964
	5	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
5	1	2,00	0,10	1,65	9,670	148,541	9,954
	2	2,00	0,10	1,85	9,630	147,926	9,913
	3	2,00	0,10	1,75	9,650	148,233	9,933
	4	2,00	0,10	1,85	9,630	147,926	9,913
	5	2,00	0,10	1,65	9,670	148,541	9,954
PROMEDIO					9,716	149,253	10,002

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 6, 7 y 8.

Tabla V. **Evaluación de la capacidad de partición de una sal neutra de la resina después de la primera rehidratación**

Resina	Núm.	A (g)	Concentración de NaOH (N)	E (mL)	Por masa de resina húmeda (meq/g)	Por masa de resina seca (meq/g)	Por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)
1	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,40	0,080	1,229	0,082
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
2	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
3	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
4	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
5	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
PROMEDIO					0,134	2,065	0,138

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 3, 4 y 5.

Tabla VI. **Evaluación de la capacidad total de intercambio iónico de la resina después de la primera rehidratación**

Resina	Núm.	A (g)	Concentración de HCl (N)	G (mL)	C _w (meq/g)	C _d (meq/g)	C _b (meq/mL)
1	1	2,00	0,10	1,00	9,800	150,538	10,088
	2	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	10,098
	3	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	10,098
	4	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	10,098
	5	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	10,098
2	1	2,00	0,10	1,70	9,660	148,387	9,944
	2	2,00	0,10	1,95	9,610	147,619	9,892
	3	2,00	0,10	1,50	9,700	149,002	9,985
	4	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
	5	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
3	1	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	10,098
	2	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	10,098
	3	2,00	0,10	1,00	9,800	150,538	10,088
	4	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	10,098
	5	2,00	0,10	1,00	9,800	150,538	10,088
4	1	2,00	0,10	1,05	9,790	150,384	10,078
	2	2,00	0,10	1,00	9,800	150,538	10,088
	3	2,00	0,10	1,05	9,790	150,384	10,078
	4	2,00	0,10	1,05	9,790	150,384	10,078
	5	2,00	0,10	1,05	9,790	150,384	10,078
5	1	2,00	0,10	2,50	9,500	145,929	9,779
	2	2,00	0,10	2,75	9,450	145,161	9,728
	3	2,00	0,10	2,60	9,480	145,622	9,758
	4	2,00	0,10	2,55	9,490	145,776	9,769
	5	2,00	0,10	2,60	9,480	145,622	9,758
PROMEDIO					9,711	149,174	9,996

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 6, 7 y 8.

Tabla VII. **Evaluación de la capacidad de partición de una sal neutra de la resina después de la segunda rehidratación**

Resina	Núm.	A (g)	Concentración de NaOH (N)	E (mL)	Por masa de resina húmeda (meq/g)	Por masa de resina seca (meq/g)	Por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)
1	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,40	0,080	1,229	0,082
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
2	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,50	0,100	1,536	0,103
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
3	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
4	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
5	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,50	0,100	1,536	0,103
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
PROMEDIO					0,130	1,991	0,133

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 3, 4 y 5.

Tabla VIII. **Evaluación de la capacidad total de intercambio iónico de la resina después de la segunda rehidratación**

Resina	Núm.	A (g)	Concentración de HCl (N)	G (mL)	C _w (meq/g)	C _d (meq/g)	C _b (meq/mL)
1	1	2,00	0,10	1,40	9,720	149,309	10,005
	2	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
	3	2,00	0,10	1,30	9,740	149,616	10,026
	4	2,00	0,10	1,20	9,760	149,923	10,047
	5	2,00	0,10	1,30	9,740	149,616	10,026
2	1	2,00	0,10	1,70	9,660	148,387	9,944
	2	2,00	0,10	1,95	9,610	147,619	9,892
	3	2,00	0,10	1,50	9,700	149,002	9,985
	4	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
	5	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
3	1	2,00	0,10	1,20	9,760	149,923	10,047
	2	2,00	0,10	1,30	9,740	149,616	10,026
	3	2,00	0,10	1,30	9,740	149,616	10,026
	4	2,00	0,10	1,30	9,740	149,616	10,026
	5	2,00	0,10	1,25	9,750	149,770	10,036
4	1	2,00	0,10	1,05	9,790	150,384	10,078
	2	2,00	0,10	1,00	9,800	150,538	10,088
	3	2,00	0,10	1,05	9,790	150,384	10,078
	4	2,00	0,10	1,05	9,790	150,384	10,078
	5	2,00	0,10	1,05	9,790	150,384	10,078
5	1	2,00	0,10	2,50	9,500	145,929	9,779
	2	2,00	0,10	2,75	9,450	145,161	9,728
	3	2,00	0,10	2,60	9,480	145,622	9,758
	4	2,00	0,10	2,55	9,490	145,776	9,769
	5	2,00	0,10	2,60	9,480	145,622	9,758
PROMEDIO					9,684	148,750	9,968

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 6, 7 y 8.

Tabla IX. **Evaluación de la capacidad de partición de una sal neutra de la resina después de la tercera rehidratación**

Resina	Núm.	A (g)	Concentración de NaOH (N)	E (mL)	Por masa de resina húmeda (meq/g)	Por masa de resina seca (meq/g)	Por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)
1	1	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	3	5,00	0,10	0,40	0,080	1,229	0,082
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	5	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
2	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	3	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	4	5,00	0,10	0,50	0,100	1,536	0,103
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
3	1	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	2	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	3	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	4	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
4	1	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	2	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	3	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	4	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	5	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
5	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	2	5,00	0,10	0,50	0,100	1,536	0,103
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
	4	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,124
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,144
PROMEDIO					0,123	1,892	0,127

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 3, 4 y 5.

Tabla X. **Evaluación de la capacidad total de intercambio iónico de la resina después de la segunda rehidratación**

Resina	Núm.	A (g)	Concentración de HCl (N)	G (mL)	C _w (meq/g)	C _d (meq/g)	C _b (meq/mL)
1	1	2,00	0,10	1,80	9,640	148,080	9,923
	2	2,00	0,10	1,80	9,640	148,080	9,923
	3	2,00	0,10	1,85	9,630	147,926	9,913
	4	2,00	0,10	1,80	9,640	148,080	9,923
	5	2,00	0,10	1,80	9,640	148,080	9,923
2	1	2,00	0,10	1,70	9,660	148,387	9,944
	2	2,00	0,10	1,95	9,610	147,619	9,892
	3	2,00	0,10	1,50	9,700	149,002	9,985
	4	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
	5	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
3	1	2,00	0,10	1,70	9,660	148,387	9,944
	2	2,00	0,10	1,70	9,660	148,387	9,944
	3	2,00	0,10	1,75	9,650	148,233	9,933
	4	2,00	0,10	1,70	9,660	148,387	9,944
	5	2,00	0,10	1,70	9,660	148,387	9,944
4	1	2,00	0,10	1,50	9,700	149,002	9,985
	2	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
	3	2,00	0,10	1,50	9,700	149,002	9,985
	4	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,975
	5	2,00	0,10	1,50	9,700	149,002	9,985
5	1	2,00	0,10	2,50	9,500	145,929	9,779
	2	2,00	0,10	2,75	9,450	145,161	9,728
	3	2,00	0,10	2,60	9,480	145,622	9,758
	4	2,00	0,10	2,55	9,490	145,776	9,769
	5	2,00	0,10	2,60	9,480	145,622	9,758
PROMEDIO					9,628	147,902	9,911

Fuente: muestra de cálculo, ecuación 6, 7 y 8.