



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Dirección General de Investigación  
Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial

INFORME FINAL

## **EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (DUROPORT)**

Equipo de investigación

**Ing. Héctor Rolando Méndez Rossal**

Ing. Oscar Giovanni Córdova Recinos

Jacquelin Andrea Corado Bautista

**Coordinador**

Investigador

Auxiliar de Investigación II

**Enero, 2015**

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

M.Sc. Gerardo Arroyo Catalán  
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar  
Coordinador General de Programas

Inga. Liuba Cabrera Villagrán  
Coordinador Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial

Ing. Héctor Rolando Méndez Rossal  
Coordinador del proyecto.

Ing. Oscar Giovanni Córdova Recinos  
Investigador

Jacquelin Andrea Corado Bautista  
Auxiliar de Investigación II

Partida Presupuestaria  
4.8.63.6.63  
Año de ejecución: 2014

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT .....	XIII
OBJETIVOS .....	XV
HIPÓTESIS .....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Descripción del problema .....	1
1.2. Definición del problema (Preguntas de investigación).....	1
1.3. Justificación .....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Poliestireno expandido .....	3
2.1.1. Propiedades fisicoquímicas.....	3
2.1.2. Principales aplicaciones.....	6
2.1.3. Proceso de producción .....	7
2.1.4. Impacto ambiental.....	11
2.1.5. Gestión de residuos de poliestireno expandido .....	14
2.2. Poliestireno.....	15
2.2.1. Propiedades generales del poliestireno .....	16
2.2.2. Reacciones de sulfonación: sustitución electrofílica aromática .....	18
2.2.2.1. Sulfonación del poliestireno.....	20
2.3. Resinas de intercambio iónico .....	22
2.3.1. Tipos de resinas de intercambio iónico. ....	24

2.3.2.	Regeneración .....	26
2.3.3.	Selectividad .....	27
2.3.4.	Propiedades características de las resinas de intercambio iónico.....	27
2.4.	Resinas para recubrimientos.....	30
2.4.1.	Componentes .....	31
2.4.2.	Formación de la película.....	32
2.4.3.	Operaciones de producción.....	33
2.4.4.	Clasificación de los recubrimientos según el tipo de ligante.....	34
2.4.5.	Propiedades .....	39
2.5.	Estado del Arte.....	42
3.	METODOLOGÍA .....	43
3.1.	Descripción geográfica de la investigación.....	43
3.2.	Periodo de la investigación.....	43
3.3.	Descripción del método y variables .....	43
3.3.1.	Alternativa de reciclaje de poliestireno expandido para producir una resina de intercambio iónico .....	43
3.3.2.	Alternativa de reciclaje de poliestireno expandido para producir una resina de recubrimiento .....	68
3.4.	Instrumentos y equipos utilizados.....	81
4.	RESULTADOS .....	85
4.1.	Evaluar la viabilidad de reciclar poliestireno expandido para producir una resina de intercambio iónico .....	85
4.2.	Evaluar la viabilidad de reciclar poliestireno expandido para producir una resina de recubrimiento .....	95

5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	107
6.	ACTIVIDADES DE GESTIÓN, VINCULACIÓN Y DIVULGACIÓN.....	123
7.	CONCLUSIONES.....	125
8.	RECOMENDACIONES .....	129
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	131
10.	ANEXOS .....	135
11.	ORDEN DE PAGO.....	151



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Poliestireno expandido (perlas) .....	3
2.	Sectores de utilización del poliestireno expandido .....	6
3.	Principales sectores que utilizan el eps para envase y embalaje .....	6
4.	Micrografía perla de poliestireno expandido .....	8
5.	Proceso de producción de poliestireno expandido .....	9
6.	Comparación análisis de ciclo de vida.....	13
7.	Estructura del poliestireno .....	15
8.	Grupos sustituyentes en reacciones electrofílica aromáticas .....	19
9.	Mecanismo de reacción de la sustitución electrofílica aromática .....	20
10.	Reacción de la sulfonación del benceno. ....	20
11.	Resinas de intercambio iónico en forma de perla .....	23
12.	Reacción de intercambio catiónico en resinas de intercambio iónico... ..	24
13.	Propiedades típicas de resinas de intercambio catiónico comerciales..	30
14.	Ecuación para determinar la cantidad de repeticiones .....	44
15.	Diagrama de flujo de procedimiento “desgasificación del poliestireno expandido” .....	48
16.	Diagrama de flujo de procedimiento “sulfonación del poliestireno y Elaboración de la sal sódica de la resina” .....	52
17.	Diagrama de flujo de procedimiento “densidad de retrolavado” .....	55
18.	Diagrama de flujo de procedimiento “retención máxima de agua” .....	57
19.	Diagrama de flujo de procedimiento “capacidad total de intercambio iónico” .....	61
20.	Equipo para la evaluación de la capacidad de salt-splitting.....	65
21.	Diagrama de flujo de procedimiento “capacidad de partición de una sal neutra” .....	66

22.	Diagrama de flujo de procedimiento “porcentaje de sólidos totales” .....	71
23.	diagrama de flujo de procedimiento “porcentaje de sólidos totales” .....	73
24.	Diagrama de flujo de procedimiento “evaluación de la viscosidad en la resina de recubrimiento” .....	75
25.	Diagrama de flujo de procedimiento “evaluación del brillo en la resina de recubrimiento” .....	77
26.	Diagrama de flujo de procedimiento “evaluación de la fineza en la resina de recubrimiento” .....	79
27.	Balanza analítica .....	81
28.	Horno de calentamiento.....	81
29.	Densidad de retrolavado de resinas de intercambio iónico preparadas a partir del reciclaje de poliestireno expandido.....	86
30.	Porcentaje de retención máxima de agua de resinas de intercambio iónico preparadas a partir del reciclaje de poliestireno expandido.....	87
31.	Capacidad de partición de una sal neutra de las resinas de intercambio iónico preparadas a partir del reciclaje de poliestireno expandido.....	88
32.	Capacidad de intercambio iónico total de las resinas de intercambio iónico preparadas a partir del reciclaje de poliestireno expandido .....	89
33.	Capacidad de partición de una sal neutra de la resina de intercambio iónica regenerada.....	90
34.	Capacidad de intercambio iónico total de la resina de intercambio iónico regenerada.....	91
35.	Capacidad de partición de una sal neutra de resina de intercambio iónico original y regenerada.....	92

36.	Capacidad de intercambio iónico total de las resinas de intercambio iónico original y regenerada .....	93
37.	Porcentaje de sólidos totales de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido .....	96
38.	Densidad de resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido utilizado .....	98
39.	Viscosidad de resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido .....	99
40.	Fineza de resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido .....	101
41.	Brillo de resinas de recubrimiento según el tipo de residuo de poliestireno expandido .....	102
42.	Anuncio publicitario de participación en programa ciencia y sociedad de radio universidad .....	123
43.	Equipo de investigación en programa de radio .....	124

## TABLAS

I.	Estabilidad química del poliestireno frente a diferentes solventes ....	4
II.	Resistencia de los diferentes tipos de poliestireno expandido a los agentes químicos .....	5
III.	Estabilidad química del poliestireno frente a diferentes solventes ..	16
IV.	Clasificación según el tipo de ligante .....	34
V.	Resultados Pruebas preliminares de la densidad de las resinas de intercambio iónico .....	45
VI.	Variables para determinar la cantidad de repeticiones .....	45
VII.	Descripción de las variables de control .....	46
VIII.	Parámetros de control “Desgasificación de poliestireno expandido”	49

IX.	Descripción de las variables de control.....	50
X.	Parámetros de control “Sulfonación del poliestireno y elaboración de la sal sódica de la resina” .....	53
XI.	Descripción de las variables de control.....	54
XII.	Parámetros de control para determinar la densidad de la resina de poliestireno .....	56
XIII.	Descripción de las variables de control.....	56
XIV.	Parámetros de control para determinar la retención máxima de agua .....	58
XV.	Descripción de las variables de control.....	58
XVI.	Parámetros de control para determinar la capacidad total de intercambio iónico por peso de resina húmeda.....	62
XVII.	Parámetros de control para determinar la capacidad total de intercambio iónico por peso de resina seca. ....	62
XVIII.	Parámetros de control para determinar la capacidad total de intercambio iónico por milímetro de resina húmeda.....	62
XIX.	Descripción de las variables de control.....	63
XX.	Parámetros de control para determinar la capacidad de partición de una sal neutra por peso de resina húmeda.....	67
XXI.	Parámetros de control para determinar la capacidad de salt-splitting por peso de resina seca. ....	67
XXII.	Parámetros de control para determinar la capacidad de partición de una sal neutra por milímetro de resina húmeda.....	67
XXIII.	Pruebas preliminares Porcentaje de solidos totales en las resinas de recubrimiento preparadas a partir de residuos de poliestireno expandido.....	68
XXIV.	Variables para determinar la cantidad de repeticiones .....	69
XXV.	Descripción de las variables de control.....	70

XXVI.	Parámetros de control “Evaluación de resina de recubrimiento: porcentaje de sólidos totales”.....	72
XXVII.	Descripción de las variables de control.....	72
XXVIII.	Parámetros de control “Evaluación de la resina de recubrimiento: peso específico”.....	74
XXIX.	Descripción de las variables de control.....	74
XXX.	Parámetros de control “Evaluación de la resina de recubrimiento: viscosidad”.....	76
XXXI.	Descripción de las variables de control.....	76
XXXII.	Parámetros de control “Evaluación de la resina de recubrimiento: brillo”.....	78
XXXIII.	Descripción de las variables de control.....	78
XXXIV.	Parámetros de control “Evaluación de la resina de recubrimiento: fineza”.....	80
XXXV.	Equipos utilizados en el marco experimental.....	81
XXXVI.	Ponderación de las características visuales de la resina de intercambio iónico producida.....	85
XXXVII.	Análisis de la varianza capacidad de partición de una sal neutra entre resina de intercambio iónico original y regenerada.....	92
XXXVIII.	Prueba LSD-Fisher comparación capacidad de partición de una sal neutra entre la resina de intercambio iónico original y regenerada.....	93
XXXIX.	. Análisis de la varianza de la comparación de capacidad de intercambio iónico total de las resinas de intercambio iónico original y regenerada.....	94
XL.	Prueba LSD-Fisher de la comparación de capacidad de intercambio iónico total de las resinas de intercambio iónico original y regenerada.....	94
XLI.	Solubilidad de poliestireno expandido en solventes orgánico.....	95

XLII.	Análisis de la varianza del porcentaje de sólidos totales de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido.....	97
XLIII.	Prueba LSD-Fisher del porcentaje de sólidos totales de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido.....	97
XLIV.	Análisis de la varianza de la densidad de las resinas de recubrimiento preparadas.....	98
XLV.	Prueba LSD-Fisher de la densidad de las resinas de recubrimiento preparadas .....	99
XLVI.	Análisis de la varianza de la viscosidad de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido.....	100
XLVII.	Prueba LSD-Fisher de la viscosidad de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido.....	100
XLVIII.	Análisis de la varianza del brillo de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido ..	102
XLIX.	Prueba LSD-Fisher del brillo de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido ..	103
L.	Costos asociados a la alternativa de reciclaje para producir una resina de recubrimiento .....	104
LI.	Costos asociados a la alternativa de reciclaje para producir una resina de intercambio iónico .....	105
LII.	Propiedades de solventes utilizados.....	116

# EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (DUROPORT)

## RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo la evaluación de dos alternativas de reciclaje de poliestireno expandido. La primera para producir una resina de intercambio iónico y la segunda un recubrimiento plástico. Esto con el fin de aprovechar las características del material para elaborar nuevos productos.

La investigación se dividió en dos áreas, una por cada alternativa. La primera es la resina de intercambio catiónico. Esta presenta la modificación de la estructura química del polímero, mediante una reacción de sulfonación, donde se crean los sitios activos para el intercambio iónico. Se determinó mediante las características visuales de las resinas preparadas, que esta reacción debe llevarse a cabo utilizando una mezcla de ácido fumante y ácido concentrado en proporción 1:9.

Además, se ejecutaron las pruebas de caracterización según la norma ASTM D2187. Se determinó la densidad y el porcentaje de retención máxima de agua. Mediante su comparación con los parámetros técnicos de las resinas comerciales se estableció que el grado de reticulación y entrecruzamiento en esta resina es inferior, lo que resulta en la menor cantidad de masa por volumen de resina y por ende una mayor porosidad y retención máxima de agua. Con las pruebas químicas de partición de una sal neutra y capacidad total de intercambio iónico los resultados 0,143 y 9,89 miliequivalentes por mililitro de resina húmeda, respectivamente, se demuestra la capacidad de intercambio de la resina y de esa forma la viabilidad de ejecución de esta alternativa.

Se evaluó también la regeneración de la resina de intercambio iónico y se demostró que esta mantiene sus propiedades fisicoquímicas. Los resultados de las pruebas de partición de una sal neutra y la capacidad de intercambio iónico total no mostraron diferencias significativas.

La segunda alternativa es la preparación de un recubrimiento, esta contempla la utilización de un solvente que sirve como vehículo de la resina. Se determinó mediante pruebas de solubilidad y parámetros técnicos que el xileno es el solvente óptimo para su disolución. En esta alternativa se evaluó y comparó la utilización de dos tipos de residuos de poliestireno expandido, de baja y alta densidad, para la preparación del recubrimiento.

Se evaluaron los parámetros de porcentaje de sólidos totales, densidad y viscosidad y se determinó que estos son independientes del tipo de residuo que se utilice ya que sus medias no presentaron diferencias significativas. También se analizó el brillo, con lo que se caracterizó la resina como brillante y la fineza que permitió la identificación de componentes contaminantes en estos. Con las propiedades obtenidas se determinó que el recubrimiento puede funcionar como un barniz brillante para su aplicación en maderas y esto permite concluir que la alternativa de reciclaje es viable.

Por último se compararon los costos asociados a la preparación de la resina, a escala laboratorio, y se obtuvo, bajo este parámetro, que la alternativa viable es la resina de recubrimiento.

## ABSTRACT

This research aimed to evaluate two polystyrene recycling alternatives. The first one, to produce an ion exchange resin, and the second one, a plastic coating. The idea is to exploit the characteristics of the material to develop new products.

The investigation was divided into two areas, one for each alternative. The first alternative is the cation exchange resin. This presents the modification of the chemical structure of the polymer by a sulfonation reaction, wherein the active ion exchange sites are created. By the visual characteristics of the prepared resins, it was determined that this reaction must be carried out using a mixture of fuming and concentrated acid in the ratio 1:9.

Furthermore, characterization tests were run according to ASTM D2187 standard. Density and a high percentage of water retention were determined. By comparing with technical parameters of commercial resins, it was established that the degree of crosslinking in the prepared resin is less, resulting in less mass per volume and hence a higher porosity and a high water retention. With the results of the chemical tests of salt-splitting and total ion exchange capacity, 0.143 and 9.89 milliequivalents per milliliter of wet resin, respectively, the exchange capacity of the resin and the feasibility of implementation of this alternative were determined.

The regeneration of the ion exchange resin was also evaluated. It showed that it maintains its physical and chemical properties as the test results of a salt-splitting and the total ion-exchange capacity showed no significant differences.

The second alternative is the preparation of a plastic coating. This contemplates the use of a solvent that serves as vehicle to the resin. Determined by solubility tests and technicians values, xylene is the optimal solvent for polystyrene dissolution. In this alternative using two types of expanded polystyrene waste, low and high density, were evaluated and compared for the preparation of the coating.

Percentage of total solids, density and viscosity were evaluated and it was determined that these are independent of the polystyrene waste used to prepare de coating. Gloss was also analysed and the resin was classified as a brilliant coating, through fineness, some contaminant components were identified. With these properties and their results the coating may work as a brilliant varnish to be applied on wood. These let us to conclude that it is feasible to recycle polystyrene to produce a coating.

At last, the preparation costs, laboratory scale, were compared, and it was established that the coating alternative is the feasible in this terms.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar la viabilidad de reciclar poliestireno expandido para producir una resina de intercambio iónico y una resina de recubrimiento.

### **Específicos**

1. Evaluar las características visuales de la resina de intercambio iónico producida a través de la sulfonación de los residuos de poliestireno expandido.
2. Determinar la densidad y retención máxima de agua de la resina de intercambio iónico producida a través de la sulfonación de los residuos de poliestireno expandido.
3. Determinar la capacidad de intercambio iónico a partir de una sal neutra y la capacidad de intercambio iónico total de la resina de intercambio iónico producida a través de la sulfonación de los residuos de poliestireno expandido.
4. Analizar la regeneración de la resina de intercambio iónico producida a través de sus características químicas
5. Comparar las características químicas de la resina de intercambio iónica producida y regenerada

6. Analizar la afinidad del poliestireno expandido con solventes orgánicos para producir una resina de recubrimiento
7. Determinar y comparar las propiedades de densidad, porcentaje de sólidos totales y viscosidad de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de poliestireno expandido utilizado.
8. Determinar y comparar el brillo y la fineza de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de poliestireno expandido utilizado
9. Establecer con respecto de las propiedades determinadas la funcionalidad del recubrimiento preparado.
10. Establecer los costos del reciclaje de las dos alternativas de reciclaje de poliestireno expandido a escala laboratorio

## **HIPÓTESIS**

Existe una alternativa viable de reciclaje de poliestireno expandido para producir una resina de intercambio iónico.

Existe una alternativa viable de reciclaje de poliestireno expandido para producir una resina de recubrimiento.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, debido al crecimiento demográfico de la población así como a la expansión de las industrias y productos manufacturados nos vemos en complicaciones que no fueron mentalizadas al momento de su creación. Un ejemplo son los desechos sólidos de una amplia gama de materiales, desde desechos orgánicos, metálicos, plásticos (polímeros de cadenas orgánicas), papel, vidrio, etc. Algunos de estos han encontrado la forma de tener un retorno como materia prima mediante reciclaje, uno de los casos más notables es el vidrio en cuanto al tema del reciclaje, pero otros han encontrado una gran dificultad para ser reutilizados.

En este caso nos enfocamos en un material que ha encontrado una dificultad en su reutilización, el poliestireno de tipo expandido es un polímero utilizado en la industria de empaques ya que ofrece una barrera protectora a muchos artículos frágiles debido a que este material conlleva una cierta cantidad de aire dentro del material que sirve de amortiguación al ser un material flexible. Este material además se utiliza como medio de transporte de alimentos y bebidas (Platos y vasos) por lo que se encuentra ampliamente en nuestro ambiente y por ello es uno de los desechos sólidos de mayor generación.

El presente proyecto tiene como fin proponer formas alternativas de utilizar los desechos de poliestireno expandido ya que actualmente no hay un movimiento de reciclaje por dificultades que presenta su reciclaje. Las alternativas son utilizar el poliestireno expandido como una resina de intercambio catiónico mediante la modificación química del material con enfoque al tratamiento de aguas residuales y además se propone como una resina de recubrimiento mediante el uso de solventes, polímeros y secantes.



# **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **1.1. Descripción del problema**

El poliestireno expandido (duroport) es uno de los materiales de mayor contribución al desarrollo industrial y económico, principalmente en la dependencia poblacional en el uso de empaques y productos hechos a base de éste. Sin embargo, después de su aprovechamiento, la degradación de los residuos puede durar hasta 1000 años, dependiendo de su tamaño y las condiciones ambientales a las que se le someta. De este modo, el poliestireno expandido muestra una desventaja que limita la sostenibilidad de su uso.

En Guatemala, el volumen de estos residuos en la basura municipal es otro de los problemas encontrados, ya que cerca del 98% del poliestireno expandido es aire, ocupando así un vasto espacio en los depósitos y basureros.

Actualmente no existe interés a nivel mundial en el reciclaje de este polímero, en comparación con otros polímeros como el PET, debido a la dificultad que conlleva la separación y el poco beneficio en relación masa de polímero- volumen de manejo de desecho lo que conlleva casi al nulo aprovechamiento integral del valor que representa el reciclaje del poliestireno expandido.

## **1.2. Definición del problema (Preguntas de investigación)**

¿Existen alternativas técnicamente viables para reciclar los residuos de poliestireno expandido?

### **1.3. Justificación**

La ejecución de esta investigación contribuirá con información científica innovadora que generará soluciones sostenibles a la problemática de la disposición final de los residuos sólidos que es el caso del poliestireno expandido. Se pretende generar metodologías prácticas aplicadas al reciclaje de este para su aprovechamiento en la elaboración de nuevos materiales: resinas de intercambio iónico y resinas para recubrimiento de bajo costo.

Las resinas de intercambio catiónico elaboradas a partir de los residuos poliestireno expandido, ofrecen una alternativa ambientalmente amigable y de menor costo con respecto de las comerciales. Este nuevo material contribuirá especialmente a las industrias nacionales que generan efluentes con materiales tóxicos; además, presenta la ventaja del requerimiento de bajos consumos energéticos. Otra potencial aplicación son las resinas para recubrimientos, entre las que podemos mencionar las pinturas alquídicas, poliuretanos y al aceite, debido a la naturaleza de este polímero.

El valor de esta investigación consiste en la contribución tanto en la disposición útil del residuo como el agregar valor intelectual a una materia prima sin explotar en potencia. Los resultados esperados de esta investigación tendrán un valor económico en cuanto a la potencial implementación de procesos industriales de reciclaje y aprovechamiento del poliestireno expandido usado. Además, estos pueden ser patentables. Además de reducir el volumen de residuos que son dañinos al medio ambiente que están presentes y se generaran mientras se utilice este tipo de material en nuestro país.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Poliestireno expandido

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.

Está compuesto en un 95% de poliestireno y 5% de aire, porcentajes en masa, que forma burbujas y reduce la densidad del material. Su aplicación principal es en el sector del envase, embalaje y la construcción.

Figura 1. **Poliestireno expandido (Perlas)**



Fuente: [http://beelinez.ru/sites/default/files/536779\\_06f16c35075e77cfbe68419277344af7.jpg](http://beelinez.ru/sites/default/files/536779_06f16c35075e77cfbe68419277344af7.jpg)

Consulta: noviembre 2014.

#### 2.1.1. Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades que caracterizan a este material, se describen a continuación:

- Densidad baja en el rango de los 10 – 35 kg/m<sup>3</sup>
- Color blanco
- Resistencia mecánica

- Higiénico; no constituye sustrato nutritivo para microorganismos
- Aislante térmico, debido al aire ocluido en la estructura del material
- Resistencia a la humedad
- Capacidad de absorción de impactos

Este material presenta estabilidad química frente a diferentes solventes y reactivos, como se observa en la Tabla I.

Tabla I. **Estabilidad química del poliestireno frente a diferentes solventes**

<b>Sustancia activa</b>	<b>Estabilidad</b>
Solución salina/ Agua de mar	Estable el EPS no se destruye con una acción prolongada
Jabones y soluciones de tensoactivos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Lejías	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos diluidos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácido clorhídrico (al 35%) ácido nítrico (al 50%)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos concentrados al 100%	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Soluciones alcalinas	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Disolventes orgánicos	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Hidrocarburos alifáticos saturados	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Aceites de parafina, vaselina	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie
Aceite de diésel	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Carburantes	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Alcoholes	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Aceites de silicona	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie

Fuente: Poliestireno expandido, <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno/> reciclado. Consulta: noviembre de 2014

Tabla II. **Resistencia de los diferentes tipos de poliestireno expandido a los agentes químicos**

Agentes	EPS Tipo Standard	EPS Difícilmente inflamable	EPS Resistente a los Aceites Diesel
Agua	+	+	+
Agua de mar	+	+	+
Ácido Clorhídrico al 36%	+	+	-
Ácido sulfúrico al 95%	+	+	-
Ácido fosfórico al 90%	+	+	-
Ácido nítrico al 68 %	+	+	-
Acido fórmico al 80 %	+	+	-
Ácido acético al 70 %	+	+	-
Hidróxido sódico al 40 %	+	+	+
Hidróxido potásico al 50 %	+	+	+
Agua amoniacal al 25 %	+	+	+
Alcohol metílico	+	+	+
Alcohol etílico	+	+	+ -
Alcohol propílico	+	+	+ -
Bencina para barnices, aceite Diesel	+	+	+ -
Carburante que contiene benceno	-	-	+
Éter acético	-	-	-
Benceno	-	-	-
Tetracloruro de carbono	-	-	-
Éter y disolventes orgánicos	-	-	-

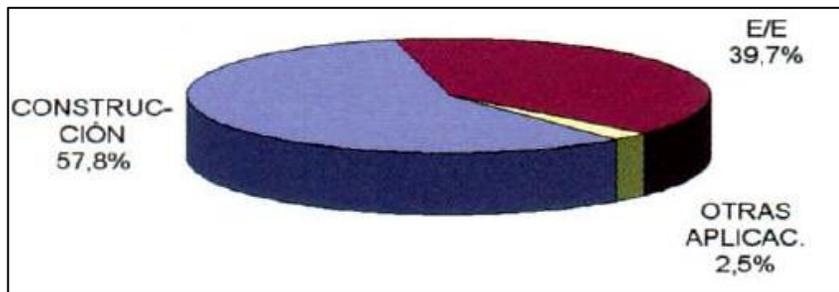
+	Estable
+ -	Limitadamente Estable
-	Inestable

Fuente: Poliestireno expandido, <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno/reciclado>. Consulta: diciembre de 2014.

### 2.1.2. Principales aplicaciones

La mayor utilización del poliestireno expandido está distribuida principalmente entre los sectores de construcción y envase/embalaje. Esto se muestra en la figura siguiente.

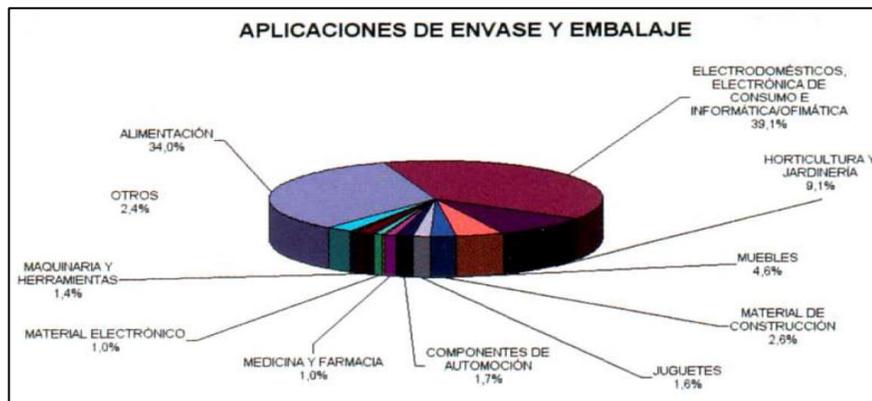
Figura 2. Sectores de utilización del poliestireno expandido



Fuente: FERREIRA B., Situación de la gestión de residuos de envases de poliestireno expandido (EPS) en la comunidad Valenciana. p.2

En la figura siguiente se muestran los principales sectores donde se utiliza como material de envase y embalaje.

Figura 3. Principales sectores que utilizan el EPS para envase y embalaje



Fuente: FERREIRA B., Situación de la gestión de residuos de envases de poliestireno expandido (EPS) en la comunidad Valenciana. p.2

### **2.1.3. Proceso de producción**

El proceso inicia con la resina de poliestireno, a la cual se le agrega un agente expansor, el cual incrementa su volumen y le confiere sus características finales, y se finaliza con las etapas de moldeo y extrusión, dependiendo del tipo de producto que se requiera. En este proceso se reduce la densidad del material hasta un 3 por ciento de su valor inicial y se obtiene un material de textura suave y de estructura cerrada.

El proceso se divide en las siguientes etapas:

- **Etapas I Pre-expansión**

La materia prima es una resina de poliestireno la cual se obtiene mediante un proceso de polimerización del estireno con adición de pentano, agente expansor, y otros aditivos.

Esta es introducida en los equipos pre-expansor. El proceso consiste el calentamiento del poliestireno a partir de vapor de agua (método común) o aire caliente (para espumas de alta densidad), donde el agente expansivo permite que este se expanda hasta alcanzar la densidad requerida. Se alcanzan temperaturas entre 80 – 100 grados Celsius.

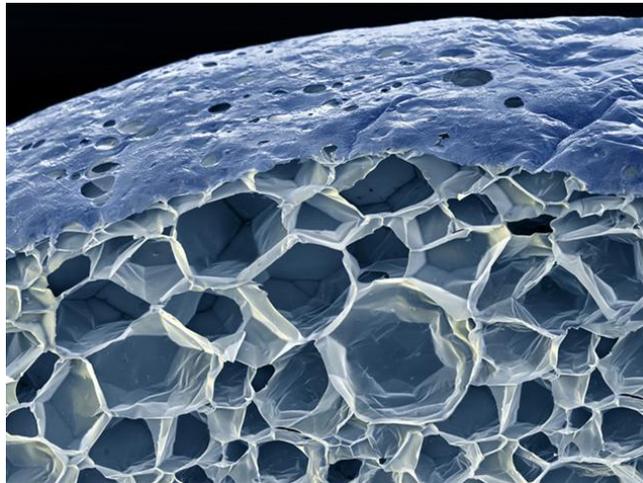
En función de diversos parámetros como la temperatura, contenido del agente expansor y del tiempo de exposición la densidad aparente del material disminuye de unos 630 kg/m<sup>3</sup> a densidades que oscilan entre los 10 - 30 kg/m<sup>3</sup>.

Durante este proceso, las perlas se mantienen en agitación para evitar que estas se fundan entre sí. Debido a que las perlas expandidas son menos

densas que las iniciales, estas se separan y se transportan hacia la parte superior del equipo donde se introducen en una cavidad y se descargan.

En esta etapa, las perlas compactas de la materia prima se convierten en perlas de plástico celular con pequeñas celdas cerradas que contienen aire en su interior.

Figura 4. **Micrografía perla de poliestireno expandido**



Fuente: <http://epsfoamprod.com.sharepoint.com/Pages/ExpandedPolystyreneRawMaterialsResin.aspx>. Consulta: diciembre de 2014.

- **Reposo intermedio y estabilización**

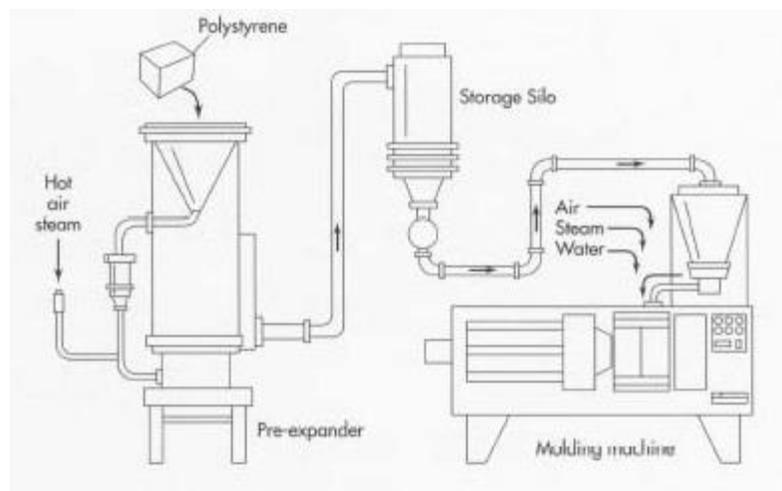
En esta etapa las perlas recién expandidas se enfrían y se crea un vacío en el interior que es preciso compensar con la penetración de aire por difusión. Para ello, el material se deja reposar en silos ventilados durante un mínimo de 12 horas.

Las perlas, alcanzan una mayor estabilidad mecánica y alcanzan una expansión superior a la obtenida inicialmente, lo que resulta ventajoso para la siguiente etapa de transformación.

Esta se lleva a cabo en silos de almacenamiento donde el material está expuesto a condiciones ambientales, lo que permite cumplir la función de la etapa y simultáneamente el secado del material.

Dependiendo de la densidad aparente del poliestireno expandido a transformar, puede someterse la materia prima pre-expandida a una segunda pre-expansión, o bien, directamente pasar al proceso de transformación propiamente dicho.

Figura 5. **Proceso de producción de poliestireno expandido**



Fuente: <http://www.madehow.com/Volume-1/Expanded-Polystyrene-Foam-EPF.html>.

Consulta: noviembre de 2014.

- **Procesos de transformación**

- Moldeado

Este proceso se realiza en equipos con moldes de la forma concreta de la pieza que se va a fabricar.

En esta etapa las perlas expandidas y maduras son trasladadas a los moldes donde se inyecta vapor de baja presión dentro y entre las perlas, este calentamiento provoca su expansión y la fusión entre sí. Las perlas se adhieren a las formas de los productos requeridos.

El molde se enfría desde su exterior, ya sea por circulación de agua, o bien, rociando agua. Debido a que el poliestireno expandido es buen aislante térmico se hace difícil el enfriamiento del molde, lo que se optimiza utilizando moldes pequeños.

- Corte / Mecanizado

- Corte en recto

Los bloques de poliestireno expandido obtenidos pueden ser cortados en planchas como último paso del proceso de fabricación. Dicho proceso se lleva a cabo mediante la utilización de una mesa de corte en tres dimensiones en la que hay dispuesto un sistema de hilos calientes que nos permiten hacer del bloque tantas planchas como sea posible de las medidas requeridas. El tamaño final de cada plancha puede ser ajustado para satisfacer las necesidades de los clientes.

- Corte en formas

Cuando es necesario obtener formas más complicadas, el bloque es mecanizado en pantógrafos de control numérico, que permite realizar cortes en dos dimensiones.

- Extrusión

El polímero es calentado y empujado por un tornillo sin fin y pasa a través de un orificio con forma de tubo. Se producen por extrusión tuberías, perfiles, vigas y materiales similares.

- Inyección

El polímero se funde con calor y fricción y se introduce en un molde frío donde el plástico solidifica. Este método se usa para fabricar objetos como bolígrafos, utensilios de cocina, juguetes, etc.

- Extrusión con soplado

En primer lugar se extrusiona un tubo de plástico que se introduce en un molde que se cierra alrededor del plástico. Entonces se introduce aire dentro del tubo de plástico, el cual se ve obligado a adquirir la forma del molde. Esta es la forma en que se obtienen las botellas de plástico.

#### **2.1.4. Impacto ambiental**

Se considera que el poliestireno expandido presenta un impacto ambiental menor al de otros materiales de la industria del envase, embalaje y construcción. Esto principalmente a que no contiene alguna sustancia dañina o

tóxica. Además, puede ser reciclado a partir de un simple proceso de triturado mecánico y se reincorpora al proceso productivo.

La Asociación Europea de Fabricantes de Poliestireno Expandido, EUMEPS, encargó la realización de un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del EPS a la consultora *Price Waterhouse Coopers-Ecobilan*, donde los principales resultados obtenidos son:

- Las fases con mayor impacto ambiental asociado se limitan a las etapas de producción de EPS virgen y la etapa de transformación.
- Respecto al consumo de recursos, la energía primaria se gasta mayormente en la producción de EPS virgen, mientras que el agua se usa primordialmente en la etapa de transformación.
- La mayoría de las emisiones gaseosas se deben a la producción de EPS a partir de materia virgen, mientras que la formación de oxidantes fotoquímicos se debe específicamente a la etapa de transformación.
- El EPS no reviste importancia en el deterioro de la capa de ozono.
- Los impactos provenientes del transporte del embalaje de EPS son mínimos ya que las distancias de transporte necesariamente son pequeñas debido a la baja densidad de este material que implica cercanía del suministrador.

Los principales impactos negativos en el ambiente que se identifican al no gestionar adecuadamente estos residuos se deben a que el producto no es biodegradable y puede existir por cientos o miles de años.

Debido a su utilización en la industria del envase y embalaje, muchos de los residuos de poliestireno expandido están contaminados y no son separados en los puntos de clasificación, por lo que la gran mayoría llegan a los vertederos municipales o rellenos sanitarios, donde incrementan el volumen total de

residuos generados. El volumen de este residuo sólido es de sus mayores impactos ya que afectan en la capacidad de los sitios destinados a la acumulación de residuos.

Debido a sus características de bajo peso y flotabilidad, junto con una inadecuada disposición puede representar un problema de contaminación marina y de océanos.

Se realizó una Análisis de Ciclo de Vida para comparar el impacto ambiental de vasos de poliestireno expandido y de papel, los resultados muestran que este tipo de material presenta un menor impacto. La figura siguiente muestra esto.

Figura 6. Comparación análisis de ciclo de vida

VENDING MACHINES CUPS <sup>(1)</sup>	EPS CUPS	PAPER CUPS
CHEMICALS	1	15
ELECTRICITY	1	13
COOLING WATER	1	1-3
PROCESS WATER	1	170
STEAM	1	6
CRUDE PETROLEUM	1	0-6
SHAPED / MOULDED PACKAGING <sup>(2)</sup>	EPS	PULP AND FIBREBOARD
ENERGY CONSUMPTION	1	2-3 - 3-8
AIR POLLUTION	1	3-1 - 4-1
WATER POLLUTION	1	2-3 - 2-8
GLOBAL WARMING POTENTIAL	1	4-0 - 4-4
VOLUME OF SOLID WASTE	1	0-69 - 0-79
PACKAGING MATERIALS <sup>(3)</sup>	EPS	WOOD, PAPER, ETC.
COST	1	1-3
WEIGHT	1	6-4
ENERGY CONSUMPTION	1	2-0
VOLUME OF SOLID WASTE	1	1-2

Fuente: [http://www.eps.co.uk/pdfs/eps\\_and\\_the\\_environment.pdf](http://www.eps.co.uk/pdfs/eps_and_the_environment.pdf). Consulta: noviembre de 2014.

### **2.1.5. Gestión de residuos de poliestireno expandido**

Se proponen distintas alternativas para la gestión de los residuos de poliestireno expandido, entre estas tenemos:

- **Reciclaje:** El poliestireno expandido se tritura mecánicamente y se mezcla con material nuevo y así formar productos del mismo material que pueden contener hasta un 50% de material reciclado.

El símbolo de reciclaje correspondiente al poliestireno es el triángulo con el número 6 y las siglas PS. Existen actualmente otras tecnologías para reciclaje como la densificación mecánica que consiste en aplicar energía mecánica y térmica a los espumados para convertirlos en partículas compactas que pueden transportarse más fácilmente. También se estudian métodos para disolver los espumados en disolventes especiales y así facilitar su transporte y reprocesamiento.

- **Reutilización:** Esta alternativa consiste en la utilización de los residuos sólidos sin procesarlos químicamente. Entre estas aplicaciones se encuentran:
  - Mejora de suelos
  - Incorporación a otros materiales de construcción
  - Producción de granza
  - Material de relleno en embalajes
- **Recuperación energética:** A partir de la combustión de los residuos se obtiene energía en forma de calor. Se puede considerar como la alternativa adecuada cuando los residuos están contaminados.

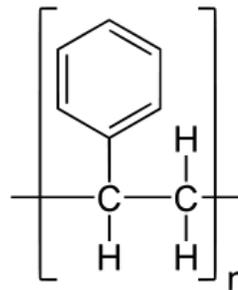
- **Vertido:** Es la alternativa menos deseada, y se basa en el vertido de los residuos en áreas destinadas para ello. Debido a que es un material biológicamente inerte, su vertido no representa algún daño potencial a la salud o generación de infecciones.

## 2.2. Poliestireno

El poliestireno es un polímero vinílico. Estructuralmente, es una larga cadena hidrocarbonada, con un grupo fenilo unido cada dos átomos de carbono. Es producido por una polimerización vinílica por radicales libres a partir del monómero estireno.

Es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno. Existen cuatro tipos principales de poliestireno el PS cristal, que es transparente, rígido y quebradizo; el poliestireno de alto impacto, resistente y opaco, el poliestireno expandido, muy ligero, y el poliestireno extrusionado, similar al expandido pero más denso e impermeable.

Figura 7. **Estructura del poliestireno**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Poliestireno#mediaviewer/File:Polystyrene.svg>.

Consulta en: noviembre de 2014.

El producto de la polimerización del estireno puro se denomina poliestireno cristal o poliestireno de uso general (GPPS, siglas en inglés). Es un

sólido transparente, duro y frágil. Es vítreo por debajo de 100 °C y por encima es fácilmente moldeable.

El peso molecular promedio del poliestireno comercial varía entre 100.000 y 400.000 g/mol. Cuanto menor es el peso molecular, mayor es la fluidez pero menor es su resistencia mecánica.

El poliestireno cristal es completamente atáctico; es decir: los grupos fenilo se distribuyen a uno u otro lado de la cadena central, sin ningún orden particular. Por ello se trata de un polímero completamente amorfo.

### 2.2.1. Propiedades generales del poliestireno

El poliestireno es un sólido transparente, duro y frágil. Este posee elasticidad, cierta resistencia al ataque químico, buena resistencia mecánica, térmica y eléctrica y baja densidad.

Tabla III. **Estabilidad química del poliestireno frente a diferentes solventes**

SUSTANCIA ACTIVA	ESTABILIDAD
Solución salina/ Agua de mar	Estable: no se destruye con una acción prolongada
Jabones y soluciones de tensoactivas	Estable: no se destruye con una acción prolongada
Ácidos diluidos	Estable: no se destruye con una acción prolongada
Ácidos concentrados (sin agua) al 100%	No estable: se contrae o se disuelve
Soluciones alcalinas	Estable: no se destruye con una acción prolongada
Disolventes orgánicos	No estable: se contrae o se disuelve
Hidrocarburos alifáticos saturados	No estable: se contrae o se disuelve
Aceite de diésel	No estable: se contrae o se disuelve
Carburantes	No estable: se contrae o se disuelve
Alcoholes (metanol, etanol)	Estable: no se destruye con una acción prolongada

Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno/reciclado>. Consulta en:

noviembre 2014

El poliestireno es un polímero termoplástico, en estos polímeros, las fuerzas intermoleculares son muy débiles y al calentar las cadenas pueden

moverse unas con relación a otras, característica que permite su moldeo. Cuando el polímero se enfría vuelven a establecerse las fuerzas intermoleculares pero entre átomos diferentes, con lo que cambia la ordenación de las cadenas.

Dentro de las propiedades que presenta es polímero, se encuentran:

- Color transparente
- Baja resistencia al impacto
- Muy baja elongación
- Buen brillo
- Liviano
- Puede ser procesado en un amplio rango de temperaturas
- Elevada fuerza de tensión
- Resistente a químicos inorgánicos y al agua
- Soluble en hidrocarburos aromáticos y purificados
- Propiedades eléctricas sobresalientes
- Densidad 1050 kg/m<sup>3</sup>
- Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) 10<sup>-16</sup> S/m
- Conductividad térmica 0.08 W/(m·K)

El poliestireno presenta la conductividad térmica más baja de todos los termoplásticos. Las espumas rígidas de poliestireno XPS presentan valores aún más bajos de conductividad, incluso menores de 0,03 W K<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>, por lo que se suele utilizar como aislante térmico.

Tiene relativamente poca resistencia a la temperatura, ya que reblandece entre 85 y 105 °C. Cuando el poliestireno es calentado las cadenas son capaces de tomar numerosas conformaciones.

El poliestireno cristal es transparente. Tiene un índice de refracción en torno a 1,57, similar al del policarbonato y el PVC. Las mezclas de PS choque y cristal son más translúcidas pero también más frágiles cuanto más PS cristal contienen. Es posible encontrar un compromiso entre ambas propiedades de forma que los objetos fabricados sean transparentes a la vez que aceptablemente resistentes.

El poliestireno tiene muy baja conductividad eléctrica, es decir, es un aislante. Por sus propiedades suele usarse en las instalaciones de alta frecuencia.

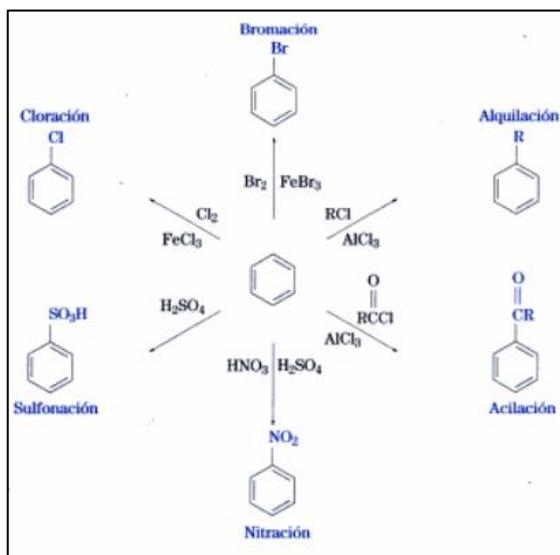
### **2.2.2. Reacciones de sulfonación: sustitución electrofílica aromática**

Esta es la reacción característica del benceno y sus derivados. En estas reacciones estos compuestos tienden a conservar su carácter aromático, es decir, la estructura electrónica del anillo bencénico y el patrón singularmente estable de enlaces  $\pi$ .

A causa de sus nubes  $\pi$ , ricas en electrones, el anillo bencénico atrae especies deficientes en electrones, es decir, electrófilos. En el curso de la reacción el electrófilo reemplaza un hidrógeno del anillo, conservando la estructura del benceno.

Mediante este tipo de reacción es posible anexar distintos sustituyentes al anillo aromático. Se le puede Halogenar (sustituir con halógeno: -F, -Cl, -I, -Br, -At), Nitrar (sustituir por un grupo nitro: -NO<sub>2</sub>), Sulfonar (sustituir por un grupo ácido sulfónico -SO<sub>3</sub>H), Alquilar (sustituir por un grupo alquilo: -R), la siguiente figura es un esquema de las posibles sustituciones.

Figura 8. Grupos sustituyentes en reacciones electrofílica aromáticas

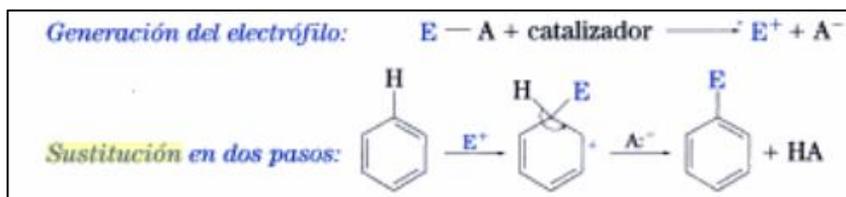


Fuente: BAILEY, Phillip. Química Orgánica: Conceptos y aplicaciones. p. 170

Para que el benceno reaccione, se debe exponer a una especie lo suficientemente reactiva como para atraer electrones de la nube  $\pi$ , esos son los electrófilos que se forman, generalmente, por la interacción del reactivo y el catalizador. El electrófilo, con carga positiva, es atraído a la nube de electrones, donde se enlaza a uno de los carbonos, formando el carbocatión que es un intermediario de la reacción.

El carbocatión, menos estable que el anillo bencénico, provoca la salida ion hidrógeno y se regenera la estructura aromática del benceno, terminando así la reacción de sustitución. El mecanismo de reacción se puede resumir según se muestra en la figura siguiente.

Figura 9. **Mecanismo de reacción de la sustitución electrofílica aromática**

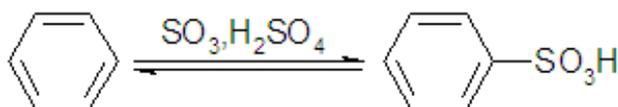


Fuente: BAILEY, Phillip. Química Orgánica: Conceptos y aplicaciones. p. 172

### 2.2.2.1. Sulfonación del poliestireno

La sulfonación es una reacción donde se fija el grupo bisulfito  $-SO_3H$  a un átomo de carbono de una molécula orgánica. El uso de compuestos orgánicos sulfonados está ligado a la presencia del grupo  $-SO_3H$ , por su carácter hidrofílico muy polar. Los grupos sulfónico están presentes en algunas resinas intercambiadoras de iones donde funcionan como ácidos fuertes.

Figura 10. **Reacción de la sulfonación del benceno.**



Fuente: Sulfonación de estructuras aromáticas. [http://es.wikipedia.org/wiki/Sustituci%C3%B3n\\_electr%C3%B3fila\\_ arom%C3%A1tica](http://es.wikipedia.org/wiki/Sustituci%C3%B3n_electr%C3%B3fila_ arom%C3%A1tica). Consulta: noviembre de 2014.

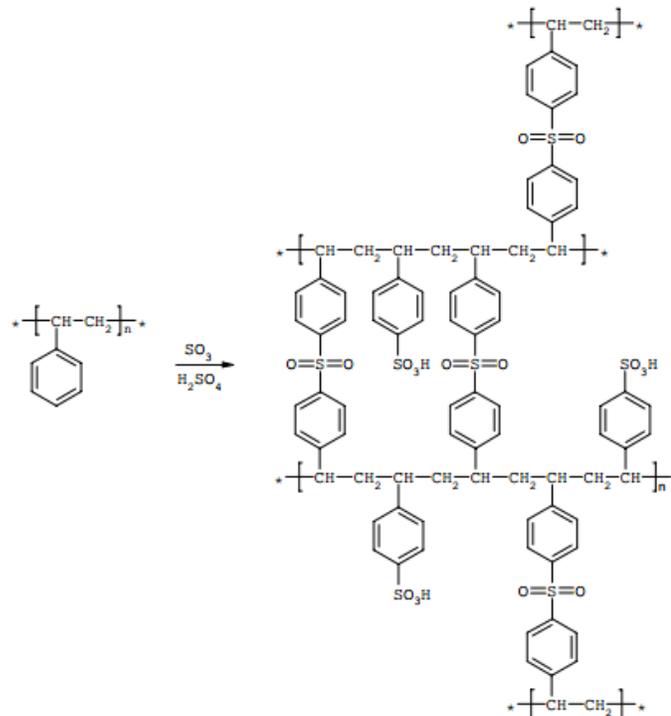
En el poliestireno, los grupo bisulfito se fijan en los anillos aromáticos, estos pueden sulfonarse con ácido sulfúrico fumante ( $H_2SO_4 + SO_3$ ) mediante una reacción de sustitución aromática electrofílica.

Los agentes de sulfonación más enérgicos son el trióxido de azufre ( $SO_3$ ), el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y el óleum ( $SO_3$  en  $H_2SO_4$ ). En esta reacción el

electrófilo reactivo es  $\text{HSO}_3^+$  o  $\text{SO}_3$ , dependiendo de las condiciones de reacción.

Entre estos reactivos, para la sulfonación del poliestireno, el óleum presenta una muy buena reactividad y produce reacciones secundarias como el entrecruzamiento entre el anillo aromático del poliestireno y el grupo sulfona ( $\text{SO}_2^-$ ), pero permite a la vez formar grupos sulfónicos ( $\text{SO}_3\text{H}$ ) provenientes de la no formación del entrecruzamiento entre las sulfonas y el anillo aromático del poliestireno.

**Figura No. 9** Sulfonación del poliestireno



Fuente: Sulfonación de poliestireno. <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAR07/leon.pdf>.

Consulta: noviembre de 2014.

### **2.3. Resinas de intercambio iónico**

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de masa fluido-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales.

Las cargas de los grupos iónicos inmóviles se equilibran con las de otros iones, de signo opuesto, denominados contra iones, que están libres y que son los que se intercambian realmente con los del electrolito disuelto. Los intercambiadores de iones pueden ser intercambiadores catiónicos, que intercambian iones cargados positivamente (cationes), o intercambiadores aniónicos que intercambian iones con carga negativa (aniones).

La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia. Los intercambiadores de iones suelen contener resinas de intercambio iónico (porosas o en forma de gel), zeolitas, montmorillonita, arcilla y humus del suelo.

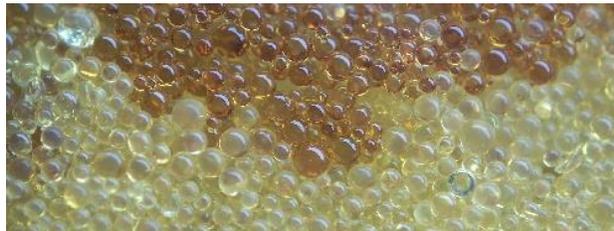
Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua, que se presentan en forma de esferas o perlas, de 0.3 a 1.2 mm de tamaño efectivo, o bien en forma de polvo.

Estas están constituidas por una estructura macrocelular de peso molecular elevado. Suelen estar constituidas por polímeros de la familia de los estirenos, divinilbencenos o incluso polímeros acrílicos o metacrílicos que aseguran la insolubilidad y actúan como soporte de los grupos funcionales.

Además, que le confieren las propiedades mecánicas de resistencia al impacto, a la fricción, compresión, elasticidad y resistencia química y térmica.

Se considera como una estructura de cadenas hidrocarbonadas a las que se encuentran unidos de forma rígida grupos iónicos libres. Estas cadenas se encuentran unidas transversalmente formando una matriz tridimensional que proporciona rigidez a la resina y donde el grado de reticulación o entrecruzamiento determina la estructura porosa interna de la misma. Como los iones deben difundirse en el interior de la resina para que ocurra el intercambio, la selección del grado de reticulación puede limitar la movilidad de los iones participantes.

Figura 11. **Resinas de intercambio iónico en forma de perla**



Fuente: Resinas de intercambio iónico. <http://www.desmineralizadores.com/tipos.html>.  
Consulta: noviembre de 2014.

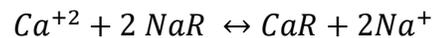
En general las resinas de intercambio iónico operan en columnas, para favorecer el proceso de intercambio, parecido a la destilación o la destilación en bandejas. La reacción de intercambio se desplaza en el lecho de resina, generalmente hacia los niveles inferiores.

Al producirse el intercambio iónico, la capacidad de la resina comienza a decrecer, debido a que posee una capacidad limitada para la remoción de iones de las soluciones y debido a esto, en un momento dado habrá cedido la mayoría de sus iones de sustitución y se producirá un cierto pase de iones no

deseados en el agua producida y se dice que esta resina está "agotada" o saturada de los iones que ha atrapado.. Por este motivo, cuando se diseña una columna de intercambio iónico, se establece a priori la concentración máxima admisible de iones indeseables en la salida del proceso. Cuando se llega a la concentración pre establecida, se debe proceder a regenerar la resina, para poderla utilizar en un nuevo ciclo.

El intercambio iónico puede explicarse como una reacción reversible implicando cantidades químicamente equivalentes. Se presenta la reacción para el ablandamiento de agua como ejemplo del intercambio catiónico, según la figura siguiente.

Figura 12. **Reacción de intercambio catiónico en resinas de intercambio iónico**



Fuente: [https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQU/Intercambioionico2006.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQU/Intercambioionico2006.pdf). Consulta: noviembre de 2014.

Donde R representa un lugar estacionario aniónico univalente de la resina de intercambio iónico.

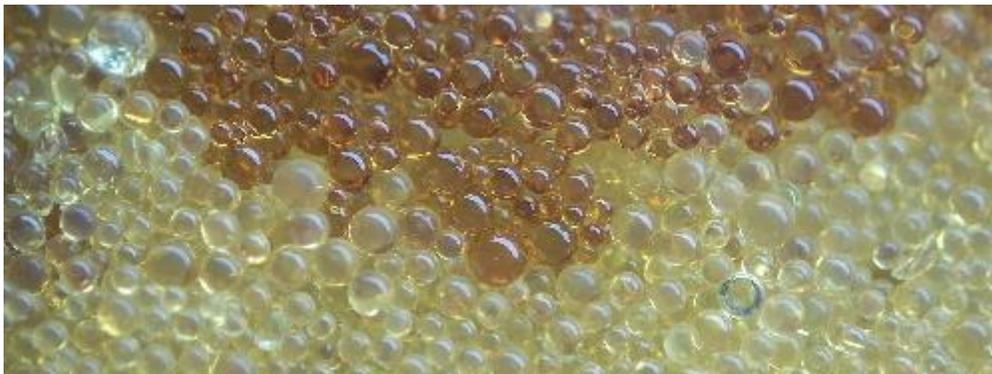
### **2.3.1. Tipos de resinas de intercambio iónico.**

Las resinas de intercambio iónico están destinadas a varios usos, descalcificación, des nitratación, deionización, etc. Existen diferentes tipos de resinas de intercambio iónicas, estas se enlistan a continuación.

- Resinas catiónicas de ácido fuerte
  - Funcionan a cualquier pH.
  - Es la destinada a aplicaciones de suavizado de agua, como primera columna de deionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos. Elimina los cationes del agua y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente ácido clorhídrico (HCl).
  - Generalmente son resinas de sodio e hidrógeno
  
- Resinas catiónicas de ácido débil:
  - Tienen menor capacidad de intercambio.
  - No son funcionales a pH bajos.
  - Elevado hinchamiento y contracción lo que hace aumentar las pérdidas de carga. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte. Es habitual regenerarlas con el ácido de desecho procedente de las de ácido fuerte.
  - Eliminan cationes asociados con bicarbonatos.
  
- Resinas aniónicas de base fuerte:
  - Es la destinada a aplicaciones de suavizado de agua, como segunda columna de deionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos. Elimina los aniones del agua y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente sosa (hidróxidosódico - NaOH).
  - Uso generalizado para eliminación de aniones débiles en bajas concentraciones, como carbonatos y silicatos.

- Resinas aniónicas de base débil:
  - Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos sosa para su regeneración.
  - No se puede utilizar a pH altos.
  - Pueden sufrir problemas de oxidación o ensuciamiento.
  - Gran eficiencia para intercambiar los aniones de los ácidos fuertes, como sulfatos, nitratos y cloruros.

**Figura No. 10** Muestra de un grupo de resinas de intercambio iónico en forma de perla (En la parte superior de la imagen se muestra resina catiónica, en la parte inferior aniónica).



Fuente: Tipos de resinas de intercambio iónico. <http://www.desmineralizadores.com/tipos.html>.  
Consulta: noviembre de 2014.

### **2.3.2. Regeneración**

La regeneración de las resinas de intercambio iónico es el proceso inverso del proceso de intercambio iónico y tiene por finalidad devolverle a la resina de intercambio iónico su capacidad inicial de intercambio. Esto se realiza lavando la resina con soluciones que contengan el ion móvil original, el cual se deposita en la resina y desaloja los iones captados durante el agotamiento.

Las resinas catiónicas fuertes primero pierden su capacidad de intercambio para captar cationes asociados a los ácidos fuertes y las resinas aniónicas fuertes disminuyen su capacidad de captar aniones débiles a baja concentración, tales como los carbonatos y silicatos.

### **2.3.3. Selectividad**

Las resinas de intercambio iónico presentan diferentes selectividades hacia los iones. A continuación se detalla el orden de selectividad de las resinas de intercambio iónico, en orden decreciente (de mayor a menor selectividad):

- Resinas catiónicas de ácidos fuertes:  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{Hg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$
- Resinas catiónicas de ácidos débiles:  $\text{H}^+$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$
- Resinas aniónicas de bases fuertes:  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{SiO}_3^{-2}$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{HSO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$
- Resinas aniónicas de bases débiles:  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{CRO}_4^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$

### **2.3.4. Propiedades características de las resinas de intercambio iónico**

Existen una serie de propiedades que definen la capacidad y funcionamiento de las resinas de intercambio iónico, estas se desarrollan en este apartado.

- Capacidad de retención de agua

Este parámetro implica la cantidad de agua retenida en la resina de intercambio iónico. Esta capacidad es proporcional al volumen de poro de la resina. Para materiales de las mismas composiciones, valores más altos de retención de agua implican menor efectividad de entrecruzamiento.

También sirve de parámetro para evaluar el estado de la resina y la ruptura del entrecruzamiento de la resina, lo que se podría interpretar como una disminución de funcionalidad o falla del material.

- Densidad de retrolavado

Este parámetro indica el volumen ocupado por masa de resina. Generalmente, la densidad húmeda (resina saturada) varía de 1,02 a 1,38 gramos por mililitro. La densidad real de cualquier resina en su estado seco o saturado dependerá del tipo de resina, estructura, grado de entrecruzamiento y formas iónicas.

- Capacidad de partición de una sal

Este parámetro determina la cantidad de mili equivalentes de hidrógeno intercambiable en una resina intercambio catiónica suficientemente ácida como para partir sales neutras.

Esta propiedad se encuentra relacionada para la medición indirecta de los grupos bisulfitos en las resinas de intercambio. G

Generalmente, es la cantidad de iones de sodio absorbidos por la resina de intercambio catiónico en la forma ácida (resina hidrógenada) a partir de una solución de cloruro de sodio, dadas por unidad de masa o volumen de resina.

- Capacidad de intercambio iónico

Esta se define como el valor de la concentración de iones que pueden ser retenidos por una unidad de peso de resina, es decir, el contenido total de centros activos de la resina y por la posibilidad de acceso a los mismos. Se expresa en mili equivalentes de soluto por gramo de resina seca.

La determinación de la capacidad máxima de una resina catiónica se realiza intercambiando ésta con una disolución básica: se produce una reacción irreversible entre el catión saliente de la resina con los iones OH<sup>-</sup> de la disolución de tal forma que si existe suficiente concentración de soluto llega a agotarse la capacidad total de la resina.

Generalmente, se utiliza en materiales que contienen grupos funcionales diferentes o además de los grupos bisulfito.

En la figura siguiente se muestran propiedades típicas de las resinas catiónicas de intercambio.

Figura 13. **Propiedades típicas de resinas de intercambio catiónico comerciales**

Commercial Name	DOWEX <sup>®</sup> * 1 X . . .	DOWEX <sup>®</sup> 50 WX . . .
<b>Type</b>	<b>Strongly Basic Anion Exchanger</b>	<b>Strongly Acid Cation Exchanger</b>
Functional group	Trimethyl ammonium	Sulfonic acid
Cross linkage (% DVB)	2 or 8	2, 4, or 8
Ionic form as shipped	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup> (analytical grade) H <sup>+</sup> (practical grade)
Shipping density (kg/l)	0.7	0.8
Volume change (%)	Cl <sup>-</sup> → OH <sup>-</sup> ~ + 20 %	Na <sup>+</sup> → H <sup>+</sup> ~ + 8 %
Effective working range (pH)	0 – 14	0 – 14
Selectivity for ions	I <sup>-</sup> > NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> > Br <sup>-</sup> > Cl <sup>-</sup> > acetate <sup>-</sup> > OH <sup>-</sup> > F <sup>-</sup>	Ag <sup>+</sup> > Cs <sup>+</sup> > Rb <sup>+</sup> > K <sup>+</sup> > NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> > Na <sup>+</sup> > Li <sup>+</sup> > Ba <sup>2+</sup> > Sn <sup>2+</sup> > Ca <sup>2+</sup> > Mg <sup>2+</sup> > Be <sup>2+</sup>
Total exchange capacity (eq/l)	1.3 OH <sup>-</sup> form max. 50°C (122°F)	1.9 Na <sup>+</sup> form max. 120°C (248°F)
Thermal stability	Cl <sup>-</sup> form max. 150°C (302°F)	H <sup>+</sup> form max. 80°C (176°F)
Moisture (%)	39 – 80	40 – 82

\*DOWEX<sup>®</sup> is a registered trademark of Dow Chemical Company.

Fuente: LIU, Sean. Food and Agricultural Wastewater Utilization and Treatment. p. 107

## 2.4. Resinas para recubrimientos

Los recubrimientos son materiales que se depositan sobre la superficie de un objeto, denominado sustrato. En muchos casos los recubrimientos son realizados para mejorar propiedades de la superficie del sustrato, tales como aspecto, adhesión, permeabilidad, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, resistencia a las ralladuras, entre otras.

Un recubrimiento o una pintura líquida es una mezcla heterogénea de productos que una vez aplicada y seca se transforma en una película continua

sin pegajosidad y con las características para las cuales fue desarrollada. Un recubrimiento puede ser una pintura, un barniz o una laca.

### **2.4.1. Componentes**

Los principales componentes de los recubrimientos se describen a continuación. Cabe aclarar que no necesariamente todos los productos pueden contener a todos los ingredientes. Estos son:

- **Pigmentos:** Son compuestos cuya función es la de proporcionar el color y el poder de recubrimiento, estos son opacos.
- **Cargas:** Generalmente, de naturaleza inorgánica, aportan cuerpo y dan estructura, viscosidad y reología a los recubrimientos. Son opacas cuando están secas pero transparentes en estado húmedo.
- **Ligante o resina:** Su función es mantener unidas las partículas sólidas, pigmentos y cargas, cuando el recubrimiento se seca. El tipo de resina define las características de secado y resistencia. También llamada polímero.
- **Disolvente:** El disolvente puede ser agua o productos orgánicos, los cuales buscan proveer al recubrimiento de una viscosidad óptima al método de aplicación. También se utilizan para solubilizar las resinas y regular la velocidad de evaporación. De igual forma se utilizan disolventes que no disuelven al ligante y se les llama co-solventes.
- **Aditivos:** Estos productos se dosifican en pequeñas cantidades para facilitar el proceso de fabricación de la pintura, además de conferirles

características específicas del producto, manejar el secado y para su estabilización.

#### **2.4.2. Formación de la película**

La película se forma de acuerdo al tipo de resina que se utiliza como ligante de la pintura o recubrimiento. El mecanismo puede ser de uno de dos tipos:

- **Secado** Este involucra la evaporación de la mezcla solvente, que provoca la transformación de la pintura líquida, aplicada sobre el sustrato, al estado sólido. Composiciones que forman película exclusivamente por cambios físicos (evaporación de disolventes y diluyentes) se les denomina termoplásticas.

Las pinturas de naturaleza termoplástica exhiben en general un rápido secado. Además, el espesor final de la película tiene una relación directa con el contenido de sólidos en volumen del producto.

- **Curado** Este involucra además de la evaporación de los solventes, reacciones químicas con elementos del ambiente, agentes en la formulación, incluso con el sustrato a recubrir.

El curado se define como el conjunto de cambios físicos y químicos que transforman el material de su estado termoplástico original (líquido o sólido, soluble y de peso molecular finito) a una condición final termoestable (sólido, insoluble, infusible y de peso molecular infinito). Las pinturas que completan la formación de película a

través de reacciones químicas (mecanismo combinado se secado/curado) se las denomina pinturas convertibles.

El curado de las pinturas no convencionales, dependiendo de la naturaleza de los diferentes grupos funcionales de la base y el convertidor, puede llevarse a cabo a temperatura ambiente (productos de doble envase) o por acción del calor (un solo envase). Otros métodos de curado incluyen radiación infrarroja, UV o de electrones.

### **2.4.3. Operaciones de producción**

El proceso de fabricación de las pinturas es totalmente físico y se efectúa en cuatro fases perfectamente diferenciadas:

- **Dispersión:** en esta fase se homogenizan disolventes, resinas y los aditivos que ayuden a dispersar y estabilizar la pintura, posteriormente se añaden en agitación los pigmentos y cargas y se efectúa una dispersión a alta velocidad con el fin de romper los agregados de pigmentos y cargas.
- **Molido:** el producto obtenido en la fase anterior no siempre tiene un tamaño de partícula homogéneo o suficientemente pequeño para obtener las características que se desean. En este caso se procede a una molturación en molinos, generalmente de perlas.
- **Dilución:** la pasta molida se completa, siempre en agitación, con el resto de los componentes de la fórmula. Los productos se deben añadir uno a uno para evitar posibles reacciones entre ellos.

- Ajuste de viscosidad: es el último paso en la elaboración de una pintura, consiste en proporcionar a la pintura fabricada un aspecto de fluidez homogéneo en todas las fabricaciones y que se ajuste a las necesidades de aplicación de la misma.

#### 2.4.4. Clasificación de los recubrimientos según el tipo de ligante

En la siguiente tabla se presentan los diferentes tipos de recubrimientos según el tipo de resina utilizada como ligante.

Tabla IV. Clasificación según el tipo de ligante

Clasificación	Descripción
Al aceite	El ligante está constituido por un aceite secante, refinado y generalmente tratado por calentamiento bajo condiciones controladas para producir los stand oils. Resisten la intemperie, secado lento.
Oleoresinas	El vehículo está basado en un barniz que se obtiene por tratamiento térmico. La resina puede ser natural o bien sintética.  Estas resinas curan más rápidamente. De acuerdo a las materias primas resisten a la intemperie y otros medios de exposición.
Resinas poliésteres	Se obtienen por reacción de condensación entre uno o más poliácidos y uno o más polioles.  Los poliésteres saturados se emplean en la industria automotriz, en el prepintado de chapas para electrodomésticos, en recubrimientos para envases y en sistemas para madera, metal, mampostería y plástico.

	<p>Los poliésteres insaturados se presentan en simple o en doble envase; la aplicación está circunscripta a barnices para madera y muebles debido a que las películas presentan en general elevada dureza, adecuado brillo y satisfactoria resistencia a reactivos químicos.</p>
Acrilatos curados por radiación	<p>Estos acrilatos insaturados se obtienen a partir del ácido acrílico o sus derivados con resinas reactivas.</p> <p>La principal área de aplicación es en la elaboración de barnices para maderas y muebles en general, pinturas, papel y tintas para imprenta. También se emplean en algunos plásticos y sustratos minerales como el vidrio. No se recomiendan para superficies metálicas debido a la baja tensión de adhesión de la película.</p>
Resinas alquídicas	<p>Estas resinas son materiales poliméricos derivados de la reacción de polioles y poliácidos. Aquellas con largo y medio nivel de aceite se usan para un secado oxidativo a temperatura ambiente en presencia de catalizadores; por su parte, las de bajo contenido de aceite curan con el oxígeno del aire forzado por el calor (horneado).</p> <p>En general se emplean como material formador de película en fondos anticorrosivos, pinturas intermedias y de terminación para ambientes urbanos exteriores, industriales no muy agresivos y marinos.</p>
Resinas acrílicas	<p>Se elaboran por reacciones de adición de diferentes monómeros, tales como ésteres de los ácidos acrílico y metacrílico con alcoholes diversos, los cuales pueden presentar o no grupos funcionales reactivos remanentes: reactivas o termoestables y no reactivas o termoplásticas, respectivamente.</p> <p>Las resinas acrílicas termoplásticas se emplean para el repintado de automotores, para la protección de mamposterías y pisos y también para mantenimiento industrial.</p>

	<p>Las resinas acrílicas termoestables generan películas con elevada retención de color, muy buena resistencia a la intemperie y agentes químicos y excelentes propiedades mecánicas; las aplicaciones son múltiples (así, por ejemplo, sobre metales desnudos debido a su excelente adhesión).</p>
Condensados de formaldehído	<p>Dependiendo de la sustancia con la cual reacciona el formaldehído, los productos poliméricos se pueden clasificar en fenólicos, melamínicos y ureicos.</p>
Resinas vinílicas	<p>Éstas pueden ser homo polímeros o bien hetero polímeros; las películas son algo duras y necesitan un plastificante externo. Requieren además una adecuada preparación de superficies. La forma de secado es por evaporación de la mezcla solvente.</p> <p>Se especifican para la protección de sustratos expuestos a atmósferas con ácidos inorgánicos, álcalis, cloro y sus derivados, etc.; para contenedores con soluciones salinas, de ácidos inorgánicos, cloradas, etc.; para estructuras sumergidas en agua de mar y agua dulce (plataformas offshore, carena de embarcaciones, etc.). Las resinas vinílicas modificadas (vinil-alquídicas, epoxi-vinílicas, etc.) tienen muchas aplicaciones en sistemas multicapa para la industria.</p>
Resinas de caucho sintético	<p>El caucho clorado adecuadamente plastificado, debido a su elevada resistencia a ácidos, álcalis y agentes químicos, se emplea en formulaciones anticorrosivas, intermedias y de terminación. Excelentes sistemas homogéneos pueden especificarse para sustratos diversos (hormigón, acero, etc.) expuestos a la luz solar, inmersión continua, etc.</p> <p>El caucho oxidado, en forma controlada, permite la elaboración de un material adecuado para la impregnación de papeles y cartones y para la elaboración de revestimientos protectores. Su insaturación residual permite reacciones de vulcanización o endurecimiento térmico.</p>

<p style="text-align: center;">Resinas epoxídicas</p>	<p>Son compuestos sintéticos con diferente grado de polimerización; éste determina el tipo de resina (líquida, semisólida y sólida).</p> <p>Las resinas epoxídicas se pueden esterificar con ácidos grasos de aceites secantes (lino, soja y ricino deshidratado). Los ésteres epoxídicos (un solo envase) secan al aire con la adición de secantes metálicos empleados para la polimerización oxidativa. Los ricos en aceite se aplican sobre madera, metal y mampostería, originando películas duras y brillantes, con excelente adhesión; por su parte, los de bajo a medio contenido de aceite son los mejores para recubrimientos industriales sometidos a grandes requerimientos mecánicos.</p>
<p style="text-align: center;">Resinas poliuretánicas</p>	<p>Los sistemas de dos envases (curado a temperatura ambiente) más frecuentes son los del tipo base poliéster; los acrílico-poliuretano y los epoxi-poliuretano. Los primeros se emplean para maderas en forma de lacas, esmaltes y barnices; se utilizan también en la construcción, industria naval, transporte pesado, maquinaria agrícola y vial, aeronaves, etc. Los segundos exhiben excelente resistencia a la intemperie, agentes químicos, hidrólisis alcalina y a la decoloración; se emplean en aplicaciones industriales, construcciones civiles, maquinaria pesada, ferrocarril, aeronaves, etc. Finalmente, los sistemas epoxi-poliuretano fueron descritos en resinas epoxídicas.</p> <p>Los sistemas de un solo envase usualmente contienen la función isocianato bloqueada; el curado con poliésteres, acrílicas y epoxis se realiza a elevada temperatura para recuperar su capacidad funcional. El curado por vía húmeda (aporte del vapor de agua del aire) genera películas con satisfactoria resistencia al agua, a los disolventes y a la intemperie pero no a los reactivos químicos; presentan buena resistencia al impacto y a la abrasión y se emplean en revestimientos para madera e imprimaciones para consolidación y endurecimiento del hormigón y mampostería.</p>

<p>Silicatos metálicos y orgánicos</p>	<p>Los ligantes basados en silicatos se pueden clasificar en inorgánicos (base acuosa) y orgánicos (la mezcla solvente está formada por alcoholes, hidrocarburos aromáticos y glicoles). Los mecanismos de formación de película son diferentes pero la estructura final silicificada es muy similar.</p> <p>Las propiedades más importantes son el buen comportamiento a temperaturas superiores a los 450/500°C, con retención de sus propiedades y la resistencia a solventes orgánicos (cetonas, hidrocarburos clorados y aromáticos, etc.) y al petróleo crudo y sus derivados. La reducida resistencia a los iones sulfato, nitrato, cloruro, dióxido de azufre, etc., debido a la solubilización del zinc metálico, constituye la desventaja más significativa; esto último fundamenta la habitual especificación de una película de terminación.</p>
<p>Resinas de silicona</p>	<p>Poseen una estructura primaria similar a aquella del cuarzo (SiO<sub>2</sub>), a la cual se le ha unido un grupo orgánico R; todas las resinas de silicona están formadas por 30 a 80 unidades trifuncionales de silicio y sus pesos moleculares oscilan entre 2000 y 5000, muy reducidos en comparación con los de las resinas orgánicas. Desde el punto de vista químico, las resinas de silicona pertenecen a un grupo intermedio entre las sustancias inorgánicas y las orgánicas puras.</p> <p>Las pinturas de resinas de siliconas pueden describirse como una pintura al látex tradicional en la que una parte del ligante está sustituido por resina de silicona; esta última permite desarrollar formulaciones que utilizan un menor contenido de ligantes (valores elevados de PVC) debido a la conocida capacidad de las siliconas para reforzar y fijar materiales inorgánicos (pigmento y elementos auxiliares) y orgánicos (ligantes).</p>

Fuente: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/tecn\\_pinturas/A-TecPin\\_I\\_a\\_V.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/tecn_pinturas/A-TecPin_I_a_V.pdf).

Consulta: noviembre de 2014

### **2.4.5. Propiedades**

Las pinturas o recubrimientos deben presentar tolerancia a los defectos de preparación de superficies, facilidad de aplicación, aptitud de secado o curado adecuado y rapidez en diferentes medios ambientales y fácil reparación de zonas dañadas. Las propiedades que deben cumplir son:

- Buena resistencia al agua y baja absorción
- Resistencia a la transferencia de vapor
- Resistencia a la transferencia de iones
- Resistencia a los fenómenos osmóticos
- Resistencia a la intemperie
- Resistencia a los agentes químicos
- Elevada adhesión seca y húmeda
- Resistencia a la abrasión
- Elasticidad o capacidad de elongación
- Resistencia a las bacterias y hongos
- Resistencia a la temperatura
- Resistencia a la radiación
- Resistencia a los esfuerzos mecánicos del medio

Es importante mencionar que dependiendo de la utilidad del recubrimiento o el fin para el que fue diseñado puede o no cumplir todas las propiedades mencionadas anteriormente.

A continuación se presentan otras propiedades que tienen gran importancia en el tema de pinturas y recubrimientos:

- Brillo

El brillo es una impresión sensorial causada por la reflexión de la luz sobre una superficie. El método más frecuente para comparar el brillo de superficies pintadas es el visual, generalmente contrastando con paneles estandarizados de brillo decreciente.

Se emplean dispositivos llamados usualmente “glossmeters”, que miden fotoeléctricamente la intensidad de un rayo de luz reflejado por la superficie en examen, en condiciones tales que el ángulo de medida es siempre igual al de incidencia.

El brillo es una propiedad particularmente importante en pinturas de terminación para exteriores (generalmente se requieren películas brillantes para facilitar la limpieza e incrementar la intensidad de la luz reflejada) como también para interiores (usualmente se especifican productos de poco brillo o bien mates para evitar las molestias causadas por la reflexión de los rayos de luz concatenados en los ojos).

- Densidad

La densidad es un valor absoluto que se expresa en gramos por centímetro cúbico. La determinación experimental emplea usualmente el picnómetro. El pigmento se debe secar previamente para facilitar la salida del aire ocluido o practicar vacío bajo agitación.

Se determina secuencialmente el peso del picnómetro vacío, luego con el pigmento y finalmente después de la incorporación de agua destilada. El volumen total corresponde al propio pigmento y el agua que llena los

intersticios. Se calcula la densidad a partir de la masa de pigmento para el volumen que ocupa el mismo.

- Viscosidad

La viscosidad solo se manifiesta en líquidos en movimiento, se ha definido la viscosidad como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Esta viscosidad recibe el nombre de viscosidad absoluta o viscosidad dinámica. Generalmente se representa por la letra griega  $\mu$ .

- Porcentaje de sólidos totales

Esta propiedad especifica el contenido total de material sólido en una pintura o recubrimiento después de perder su parte líquida (solventes) por evaporación.

La prueba consiste en colocar la muestra de la pintura o recubrimiento en un recipiente dentro de un horno, manteniéndola a una temperatura determinada durante un tiempo preestablecido, con el propósito de evaporar la parte líquida, permitiendo así calcular la fase sólida.

- Fineza

Muchos materiales sólidos deben ser molidos o molturados en finas partículas para la dispersión en vehículos líquidos. Las propiedades físicas del resultado de dispersión, se llama finura y depende del tamaño de la partícula y del grado al que ha sido dispersada.

El aparato con que se mide esta propiedad es el grindómetro que sirve para determinar la finura de molienda o la presencia de partículas de mayor tamaño o aglomerados en el proceso de dispersión. No determina el tamaño ni la distribución de las partículas.

## **2.5. Estado del Arte**

En 2005 se llevó a cabo en la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, una investigación con tema “Síntesis de un intercambiador catiónico a partir de poliestireno comercial/residual. Dicha investigación se basa en la descomposición de las cadenas de poliestireno para posteriormente entrecruzar la cadena de poliestireno con divinil benceno.

En 2007 se llevó a cabo en Universidad Autónoma de Baja California, en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería un estudio con el tema “Síntesis, caracterización y aplicación del PS entrecruzado a partir de residuos de PS”. Del mismo autor se presenta con el tema “Preparación, caracterización y aplicación de polímeros sulfonados entrecruzados” donde se menciona el uso del poliestireno sulfonado como resina de intercambio iónico.

## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. Descripción geográfica de la investigación**

La investigación se desarrolló en la Ciudad de Guatemala en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y en San Miguel Petapa en el Laboratorio de Control de Calidad de Pinturas Sega.

### **3.2. Periodo de la investigación**

La investigación tuvo un periodo de ejecución de diez meses, de febrero a noviembre del dos mil catorce.

### **3.3. Descripción del método y variables**

En este apartado se detallan los procedimientos utilizados para cada una de las alternativas de reciclaje evaluadas, así como la descripción de las variables de las mismas.

#### **3.3.1. Alternativa de reciclaje de poliestireno expandido para producir una resina de intercambio iónico**

Para la evaluación de esta alternativa se calculó el número de repeticiones que se deben de analizar para cada parámetro de calidad de la resina de intercambio iónico que se produjo a partir de los residuos de poliestireno expandido.

Se realizaron pruebas preliminares del parámetro de mayor impacto en las variables de la resina y esto se muestra a continuación.

El tipo de variable cuantitativa con la población infinita de posibles observaciones, establece que la ecuación para determinar la cantidad de repeticiones es:

Figura 14. **Ecuación para determinar la cantidad de repeticiones**

$$n = \frac{Z^2 * S^2}{d^2}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

**n**= Cantidad de repeticiones

**Z**= Valor de Z crítico

**S**= Desviación estándar de pruebas piloto

**d**= Nivel de precisión absoluta

La variable de operación que se evaluará es la densidad ya que es una medición indirecta de la cantidad de grupos sulfonados. Los resultados de las pruebas preliminares son:

Tabla V. **Resultados Pruebas preliminares de la densidad de las resinas de intercambio iónico**

Muestra	Densidad (g/mL)
1	0,96
2	0,96
3	0,96
4	0,96
5	0,95
6	0,95

Fuente: elaboración propia.

Con ello se obtienen los valores para determinar la cantidad de muestras a realizar, esto se muestra en la tabla siguiente.

Tabla VI. **Variables para determinar la cantidad de repeticiones**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<i>Nivel de confianza</i>	95%
<i>Z crítico</i>	1.96
<i>S (desviación estándar pruebas piloto)</i>	0.0052 g/mL (Valor obtenido directamente de los datos del piloto)
<i>d (nivel de precisión)</i>	±0.01 g/mL

Fuente: elaboración propia.

Se aplicó la ecuación anterior:

$$n = \frac{1.96^2 * 0.0052^2}{0.01^2} = 1.04 = 2 \text{ repeticiones}$$

Debido al valor obtenido, se aumentó el número de repeticiones a 5.

A continuación se presentan las metodologías experimentales, su descripción y detalle. Así como las variables involucradas en los parámetros de análisis de cada prueba

- Desgasificación del poliestireno expandido (pre-tratamiento)
  - Variables del procedimiento

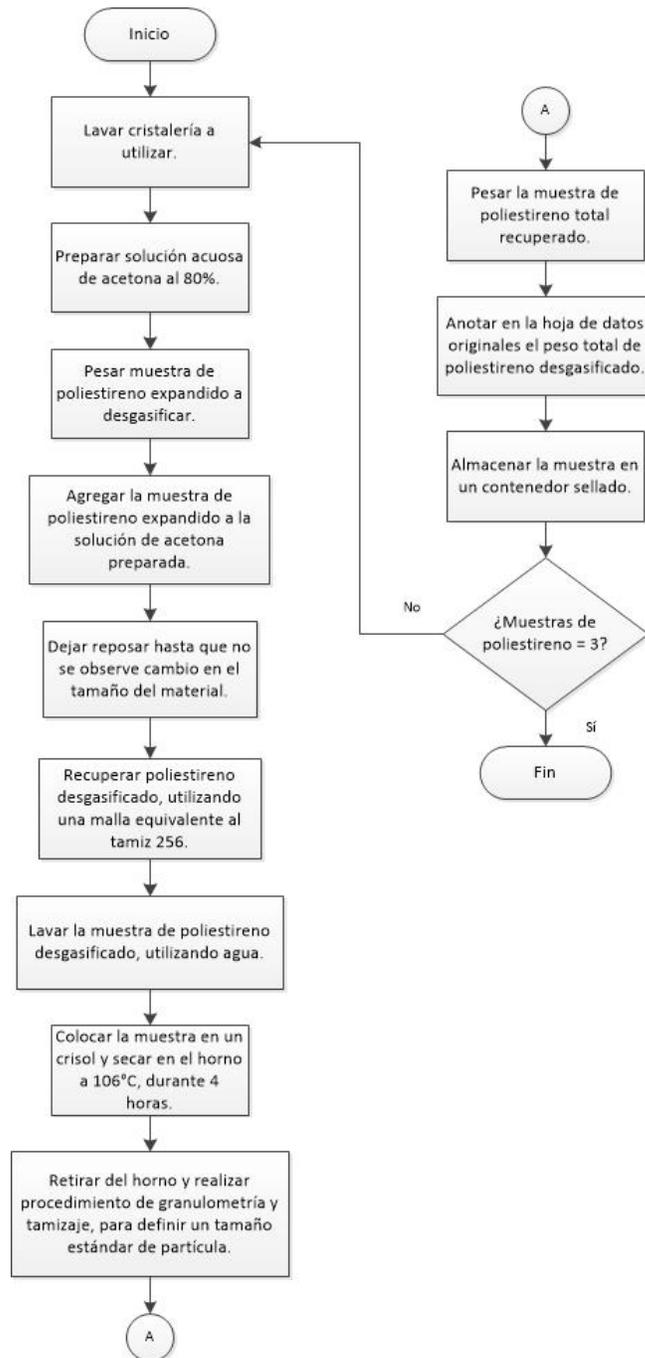
Tabla VII. Descripción de las variables de control

No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Proporción acetona: agua	%v/v		x	x		Porcentaje de acetona en la disolución
2	Masa inicial	g	x			x	Masa inicial de residuo de poliestireno expandido
3	Masa final	g	x			x	Masa final de residuos sin gas
4	Tiempo de desgasificación	min	x			x	Tiempo que tarda el poliestireno en liberar el gas contenido, hasta que no se observe cambio de tamaño
5	Tiempo de secado	min	x			x	Tiempo de secado de muestra sin gas.
6	Temperatura de secado	°C		x	x		Temperatura de secado
<b>Var:</b> Variable <b>Const:</b> Constante <b>Dep:</b> Dependiente <b>Ind:</b> Independiente							

Fuente: elaboración propia.

- Procedimiento “Desgasificación del poliestireno expandido (pre-tratamiento)”
  1. Se lavó cristalería a utilizar.
  2. Se preparó solución acuosa de acetona al 80%.
  3. Se pesó muestra de poliestireno expandido a desgasificar.
  4. Se agregó la muestra de poliestireno expandido a la solución de acetona preparada.
  5. Se reposó, mientras la desgasificación se lleva a cabo, hasta que no se observe cambio en el tamaño del material.
  6. Se recuperó poliestireno desgasificado, utilizando una malla equivalente al tamiz 256.
  7. Se lavó la muestra de poliestireno desgasificado, utilizando agua.
  8. Se colocó la muestra en un crisol y secar en el horno a 106°C, durante 4 horas.
  9. Se retiró del horno y realizar procedimiento de granulometría y tamizaje, para definir un tamaño estándar de partícula.
  10. Se pesó la muestra de poliestireno total recuperado.
  11. Se anotó en la hoja de datos originales el peso total de poliestireno desgasificado.
  12. Se almacenó la muestra en un contenedor sellado.

Figura 15. Diagrama de flujo de procedimiento “Desgasificación del poliestireno expandido”



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla VIII. **Parámetros de control “Desgasificación de poliestireno expandido”**

<b>No. de muestra</b>	<b>Masa inicial (g) (poliestireno expandido)</b>	<b>Tiempo de desgasificación (min)</b>	<b>Masa final (g) (poliestireno desgasificado)</b>
1 (Embalaje televisor)	$m_1ps_1$	$m_2ps_1$	$m_3ps_1$
2 (Embalaje equipo)	$m_1ps_2$	$m_2ps_2$	$m_3ps_2$
3 (Perlas)	$m_1ps_3$	$m_2ps_3$	$m_3ps_3$
<b>Porcentaje de acetona en la solución</b>		%1	
<b>Temperatura de secado (°C)</b>		Tsec	
<b>Tiempo de secado (min)</b>		tsec	

Fuente: Elaboración propia.

- Sulfonación del poliestireno expandido y elaboración de la sal sódica de la resina
  - Variables del procedimiento

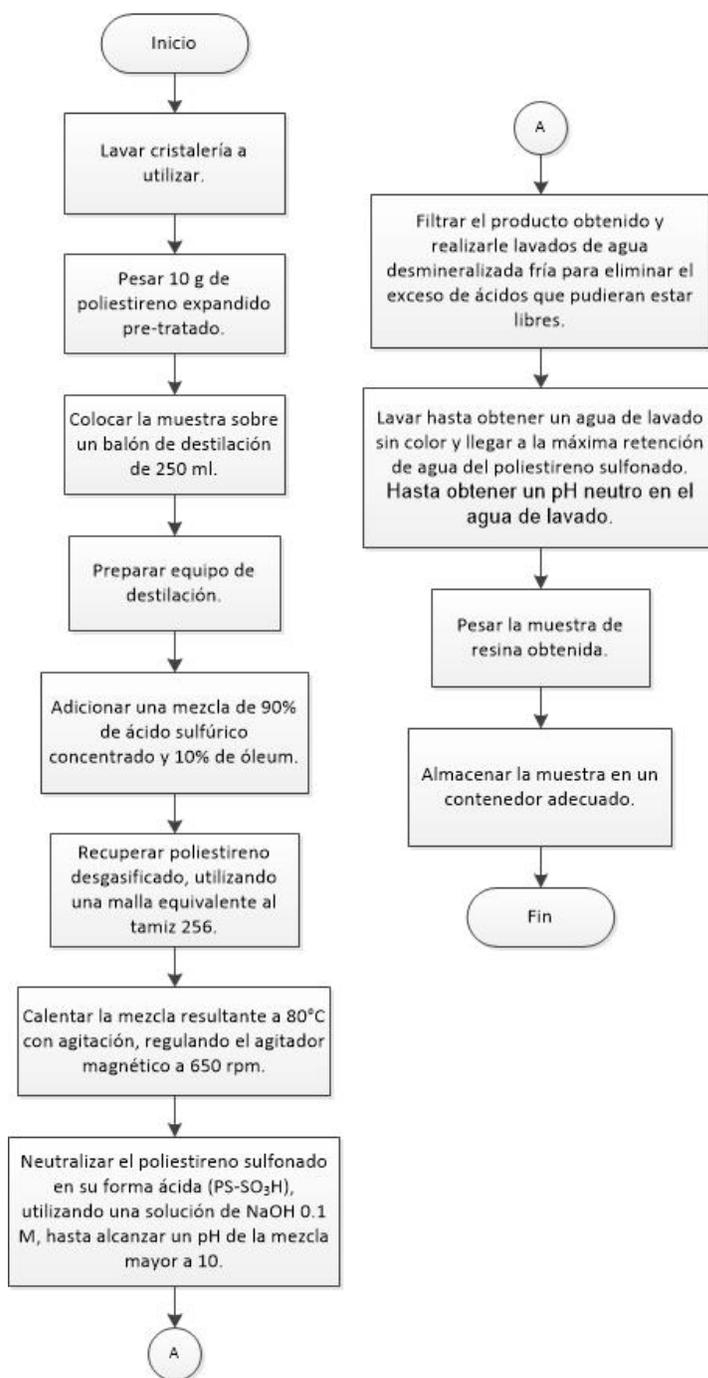
Tabla IX. Descripción de las variables de control

No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Tiempo sulfonación	min		x		x	Tiempo necesario para obtener cierto grado de sustitución
2	Masa inicial	g	x		x		Cantidad de polímero a sulfonar
3	Proporción ácido: poliestireno	--		x		x	Proporción de ácido concentrado respecto a la cantidad de polímero
4	Proporción oleum: ácido sulfúrico concentrado	--		x		x	Proporción de oleum utilizado respecto a la cantidad de polímero
5	Agitación	rpm		x		x	Velocidad de agitación de la mezcla
6	Masa final	g	x		x		Masa del polímero sulfonado resultante
<b>Var:</b> Variable <b>Const:</b> Constante <b>Dep:</b> Dependiente <b>Ind:</b> Independiente							

Fuente: elaboración propia.

- Procedimiento “Sulfonación del poliestireno y elaboración de la sal sódica de la resina”
  1. Se lavó cristalería a utilizar.
  2. Se pesó 10 g de poliestireno expandido pre-tratado.
  3. Se colocó la muestra sobre un balón de destilación de 250 mL provisto de un condensador, embudo de adición, trampa para la humedad y un baño maría.
  4. Se agregó una mezcla de 90% de ácido sulfúrico concentrado y 10% de óleum (trióxido de azufre en ácido sulfúrico al 33%).
  5. Se calentó la mezcla resultante a 80°C con agitación, regulando el agitador magnético a 650 rpm.
  6. Se neutralizó el poliestireno sulfonado en su forma ácida (PS-SO<sub>3</sub>H), utilizando una solución de NaOH 0.1 M, hasta alcanzar un pH de la mezcla mayor a 10.
  7. Se filtró el producto obtenido y realizarle lavados de agua desmineralizada fría para eliminar el exceso de ácidos que pudieran estar libres.
  8. Se lavó hasta obtener un agua de lavado sin color y llegar a la máxima retención de agua del poliestireno sulfonado. Hasta obtener un pH neutro en el agua de lavado.
  9. Se pesó la muestra de resina obtenida.
  10. Se almacenó la resina en un contenedor adecuado.

Figura 16. Diagrama de flujo de procedimiento “Sulfonación del poliestireno y elaboración de la sal sódica de la resina”



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla X. **Parámetros de control “Sulfonación del poliestireno y elaboración de la sal sódica de la resina”**

<b>No. de muestra</b>	<b>Peso inicial (g) (poliestireno expandido)</b>	<b>Peso final de resina sulfonada (g)</b>
<b>1 (Mezcla)</b>	$mr_1$	$mrs_1$
<b>2 (Mezcla)</b>	$mr_2$	$mrs_2$
<b>3 (Mezcla)</b>	$mr_3$	$mrs_3$

Fuente: elaboración propia.

- Evaluación de resina de intercambio iónico: Densidad de retrolavado según norma ASTM D 2187 – 94 (2004)
  - Variables del procedimiento

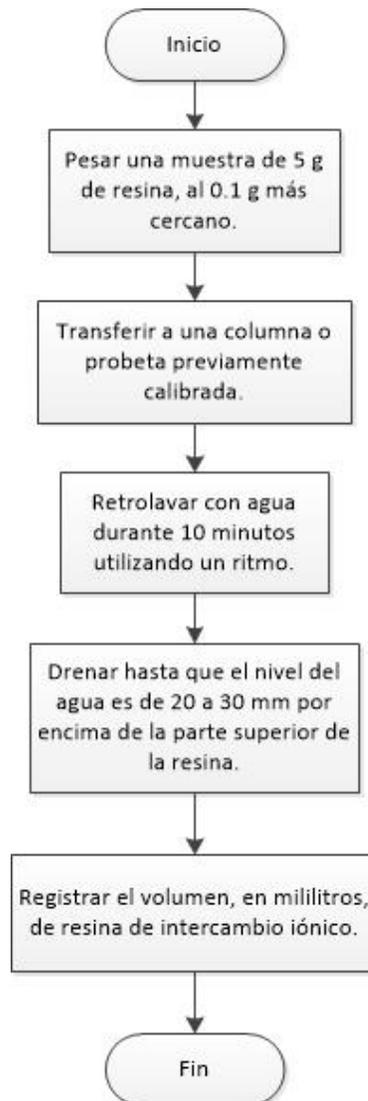
Tabla XI. Descripción de las variables de control

No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Masa	min		x		x	Masa de la muestra de la resina
2	Volumen total	mL	x		x		Volumen de la muestra
3	Volumen de agua	mL		x		x	Volumen de agua agregado a la resina
<b>Var:</b> Variable <b>Const:</b> Constante <b>Dep:</b> Dependiente <b>Ind:</b> Independiente							

Fuente: elaboración propia.

- Procedimiento de evaluación de la densidad de retrolavado según norma ASTM D 2187 – 94 (2004)
  1. Se pesó una muestra de 5 g de resina, al 0.1 g más cercano.
  2. Se transfirió a una columna o probeta previamente calibrada.
  3. Se retrolavó con agua durante 10 minutos utilizando un ritmo.
  4. Se drenó hasta que el nivel del agua es de 20 a 30 mm por encima de la parte superior de la resina.
  5. Se registró el volumen, en mililitros, de resina de intercambio iónico.

Figura 17. Diagrama de flujo de procedimiento “Densidad de retrolavado”



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla XII. **Parámetros de control para determinar la densidad de la resina de poliestireno**

No. de muestra	Peso muestra húmeda (g)	Volumen de agua agregado (mL)	Volumen total (mL)	Densidad (g/mL)	Densidad promedio (g/mL)
X <sub>1</sub>	mX <sub>1</sub>	VX <sub>1</sub>	VX <sub>1</sub>	dx <sub>1</sub>	d <sub>prom</sub>
X <sub>2</sub>	mX <sub>2</sub>	VX <sub>2</sub>	VX <sub>2</sub>	dx <sub>2</sub>	
X <sub>3</sub>	mX <sub>3</sub>	VX <sub>3</sub>	VX <sub>3</sub>	dx <sub>3</sub>	

Fuente: elaboración propia.

- Evaluación de resina de intercambio iónico: Retención máxima de agua norma ASTM D 2187 – 94 (2004)
  - Variables del procedimiento

Tabla XIII. **Descripción de las variables de control**

No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Masa inicial	g		x		x	Masa inicial de la resina
2	Temperatura secado	°C		x		x	Temperatura de secado hasta peso constante
3	Tiempo secado	min		x		x	Duración del periodo de secado
4	Masa final	g	x		x		Masa final de la resina
<b>Var:</b> Variable <b>Const:</b> Constante <b>Dep:</b> Dependiente <b>Ind:</b> Independiente							

Fuente: elaboración propia.

- Procedimiento de evaluación de la retención máxima de agua según norma ASTM D 2187 – 94 (2004)

1. Se pesó 5 gramos de la resina
2. Se secó la resina durante 18 2 horas a una temperatura de 104 2°C
3. Se removieron las muestras y se enfriaron durante 30 minutos en un desecador
4. Se pesó la muestra seca

Figura 18. **Diagrama de flujo de procedimiento “Retención máxima de agua”**



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla XIV. **Parámetros de control para determinar la retención máxima de agua**

No. de muestra	Peso muestra húmeda (g)	Peso vidrio de reloj (g)	Peso después de secado (g)	Peso muestra seca (g)	Porcentaje de agua retenida (%)	Porcentaje de agua retenida promedio (%)
X <sub>1</sub>	m <sub>X1</sub>	m <sub>v</sub> X <sub>1</sub>	m <sub>2</sub> X <sub>1</sub>	M <sub>X1</sub>	%X <sub>1</sub>	% <sub>prom</sub>
X <sub>2</sub>	m <sub>X2</sub>	m <sub>v</sub> X <sub>2</sub>	m <sub>2</sub> V <sub>X2</sub>	M <sub>X2</sub>	%X <sub>2</sub>	
X <sub>3</sub>	m <sub>X3</sub>	m <sub>v</sub> X <sub>3</sub>	m <sub>2</sub> V <sub>X3</sub>	M <sub>X3</sub>	%X <sub>3</sub>	

Fuente: elaboración propia.

- Evaluación de resina de intercambio iónico: Capacidad total de intercambio iónico norma ASTM D 2187 – 94 (2004)
  - Variables del procedimiento

Tabla XV. **Descripción de las variables de control**

No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Peso inicial de la resina húmeda	g		x		x	Peso de la resina antes de la prueba
2	Normalidad de la solución de NaOH/NaCl	N		x		x	Concentración de la solución de NaOH/NaCl
3	Volumen de valoración con solución de HCl	mL	x		x		Volumen de HCl gastado en la valoración
4	Normalidad de la solución de HCl	N		x		x	Concentración de la solución de HCl
5	Capacidad total de intercambio por gramo húmedo	meq/g	x		x		Capacidad total de intercambio iónico por gramo húmedo
6	Porcentaje de agua retenida promedio	%	x		x		Porcentaje de agua retenida en la muestra

Continuación Tabla XV.

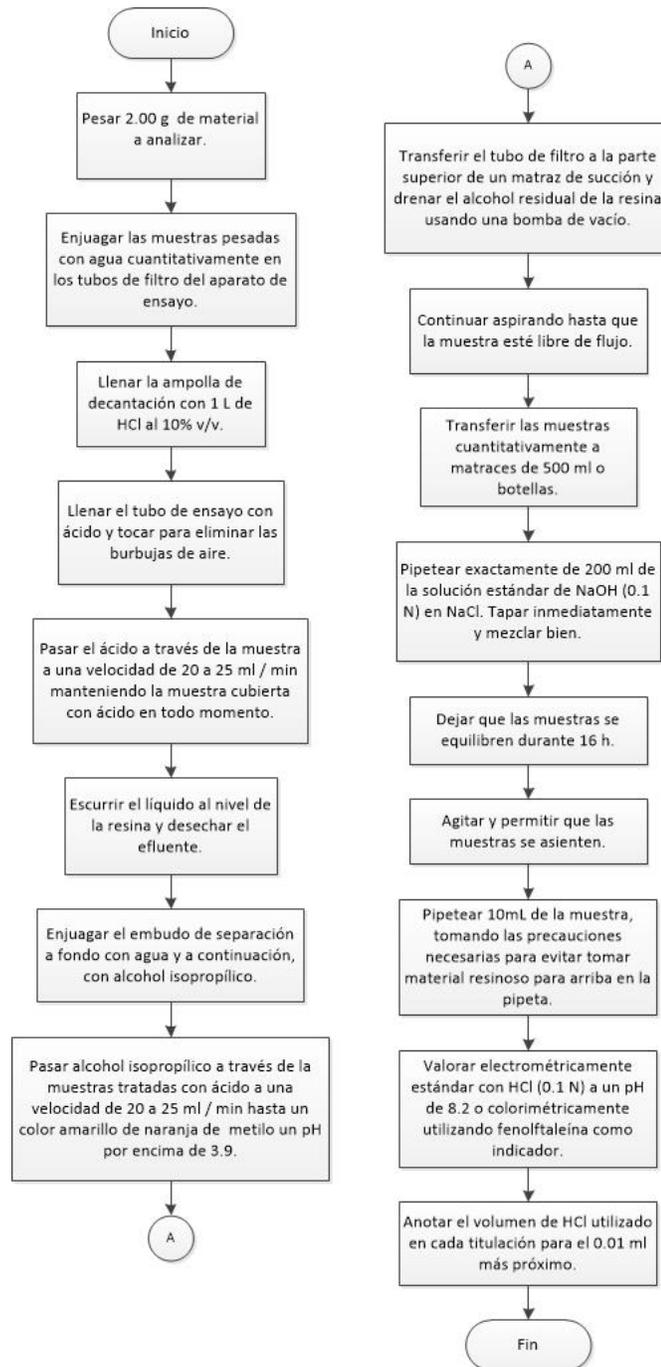
7	Capacidad total de intercambio por gramo seco	meq/g	x		x		Capacidad total de intercambio iónico por gramo seco
8	Densidad promedio	g/mL		x		x	Densidad promedio de la muestra
9	Capacidad total de intercambio por mililitro de retrolavado	meq/mL	x		x		Capacidad total de intercambio iónico por mililitro de retrolavado
<b>Var:</b> Variable <b>Const:</b> Constante <b>Dep:</b> Dependiente <b>Ind:</b> Independiente							

Fuente: elaboración propia.

- Procedimiento de evaluación de la capacidad de intercambio iónico total según norma ASTM D 2187 – 94 (2004)
1. Se pesaron 2 g de material.
  2. Se enjuagaron las muestras pesadas con agua cuantitativamente en los tubos de filtro del aparato de ensayo.
  3. Se llenó la ampolla de decantación con 1 L de HCl al 10% v/v.
  4. Se llenó el tubo de ensayo con ácido y tocar para eliminar las burbujas de aire.
  5. Se pasó el ácido a través de la muestra a una velocidad de 20 a 25 mL / min manteniendo la muestra cubierta con ácido en todo momento.
  6. Se escurrió el líquido al nivel de la resina y desechar el efluente.
  7. Se enjuagó el embudo de separación a fondo con agua y a continuación, con alcohol isopropílico.
  8. Se pasó alcohol isopropílico a través de la muestras tratadas con ácido a una velocidad de 20 a 25 mL / min hasta un color amarillo de naranja de metilo un pH por encima de 3.9.
  9. Se transfirió el tubo de filtro a la parte superior de un matraz de succión y drenar el alcohol residual de la resina usando una bomba de vacío.
  10. Se aspiraron hasta que la muestra estuvo libre de flujo.

11. Se transfirieron las muestras cuantitativamente a matraces de 500 mL o botellas.
12. Se tomaron exactamente de 200 mL de la solución estándar de NaOH (0.1 N) en NaCl. Tapar inmediatamente y mezclar bien.
13. Se dejó que las muestras se equilibren durante 16 h.
14. Se agitó y se permitió que las muestras se asienten.
15. Se tomaron 10mL de la muestra, tomando las precauciones necesarias para evitar tomar material resinoso para arriba en la pipeta.
16. Se valoró con estándar HCl (0.1 N) a un pH de 8.2 o colorimétricamente utilizando fenolftaleína como indicador.
17. Se anotó el volumen de HCl utilizado en cada titulación para el 0.01 mL más próximo.

Figura 19. Diagrama de flujo de procedimiento “Capacidad total de intercambio iónico”



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

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

No. de muestra	Peso 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)
X <sub>1</sub>	m <sub>X1</sub>	N	v <sub>X1</sub>	N	C <sub>t1</sub>
X <sub>2</sub>	m <sub>X2</sub>	N	v <sub>X2</sub>	N	C <sub>t2</sub>
X <sub>3</sub>	m <sub>X3</sub>	N	v <sub>X3</sub>	N	C <sub>t3</sub>

Fuente: elaboración propia.

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

No. de muestra	Porcentaje de agua retenida promedio (%)	Capacidad total de intercambio por gramo seco (meq/g)
v	%	C <sub>ts1</sub>
X <sub>2</sub>	%	C <sub>ts2</sub>
X <sub>3</sub>	%	C <sub>ts3</sub>

Fuente: Elaboración propia

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

No. de muestra	Densidad promedio (g/mL)	Capacidad total de intercambio por mililitro de retrolavado (meq/mL)
X <sub>1</sub>	d <sub>prom</sub>	C <sub>tv1</sub>
X <sub>2</sub>	d <sub>prom</sub>	C <sub>tv2</sub>
X <sub>3</sub>	d <sub>prom</sub>	C <sub>tv3</sub>

Fuente: Elaboración propia

- Evaluación de resina de intercambio iónico: Capacidad de partición de una sal neutra según norma ASTM D 2187 – 94 (2004)
  - Variables del procedimiento

Tabla XIX. Descripción de las variables de control

No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Peso inicial de la resina húmeda	g		x		x	Peso de la resina antes de la prueba
2	Normalidad de la solución de NaOH	N		x		x	Concentración de la solución de NaOH
3	Volumen de valoración con solución de NaOH	mL	x		x		Volumen de NaOH gastado en la valoración
4	Capacidad de salt-splitting por gramo húmedo	N	x		x		Capacidad de salt-splitting por gramo húmedo
5	Porcentaje de agua retenida promedio	%		x		x	Porcentaje de agua retenida en la muestra
6	Capacidad de salt-splitting por gramo seco	meq/g	x		x		Capacidad de salt-splitting por gramo seco
7	Densidad promedio	g/mL		x		x	Densidad promedio de la muestra
8	Capacidad de salt-splitting por mililitro de retrolavado	meq/mL	x		x		Capacidad de salt-splitting por mililitro de retrolavado

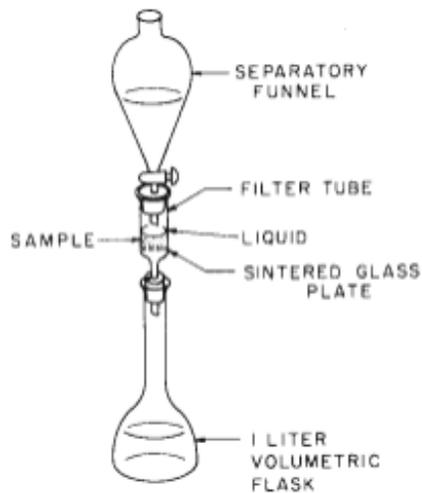
**Var:** Variable **Const:** Constante **Dep:** Dependiente **Ind:** Independiente

Fuente: elaboración propia.

- Procedimiento de evaluación de la capacidad de partición de una sal neutra según norma ASTM D 2187 – 94 (2004)
1. Se pesaron en beakers de 100 mL, tres muestras de 5 g de la resina.
  2. Se preparó solución de HCl, diluyendo 100 mL de ácido en 500 mL de agua.
  3. Se preparó solución de NaCl, disolviendo 50 g en 800 mL de agua y diluir en 1L.
  4. Se enjuagaron las muestras pesadas con agua en el tubo filtro.
  5. Se llenó la ampolla de decantación con 0.5 L de la solución de HCl.
  6. Se llenó el tubo de muestras con ácido y tapanlo para remover las burbujas de aire.
  7. Se unió la punta de la ampolla de decantación con el tubo filtro, utilizando un tapón de hule horadado.
  8. Se hizo pasar el ácido por la muestra con un ritmo de 20 a 25 mL/min, manteniendo la muestra cubierta con ácido siempre.
  9. Se escurrió el líquido al nivel de la resina y desechar el efluente.
  10. Se enjuagó la ampolla de decantación completamente con agua.
  11. Se hizo fluir agua por las muestras tratadas con ácido a un ritmo de 20 a 25 mL/min, hasta que el efluente tenga un pH mayor a 3.9, o se torne amarillo al naranja de metilo.
  12. Se escurrió el líquido al nivel de la resina y desechar el efluente.
  13. Se unió un matraz aforado al tubo filtro utilizando un tapón de hule.
  14. Se llenó la ampolla de decantación con 0.5 L de solución de NaCl.
  15. Se hizo pasar la solución por la muestra con un ritmo de 20 a 25 mL/min, manteniendo la muestra cubierta con solución en todo momento.
  16. Se colectó el efluente en el matraz aforado, hasta llegar a un volumen de 0.5 L de efluente colectado.

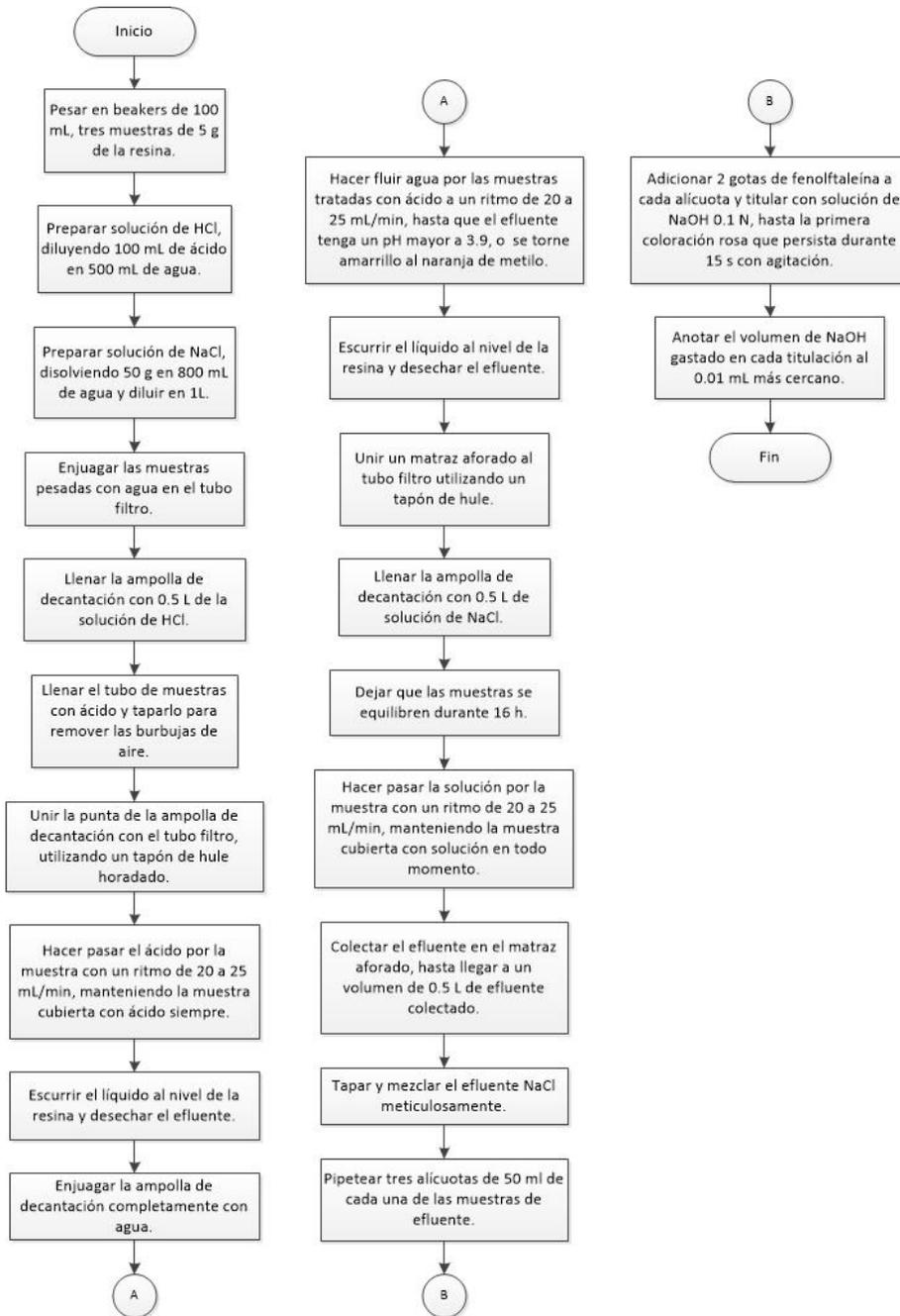
17. Se tapó y mezcló el efluente NaCl meticulosamente.
18. Se tomaron tres alícuotas de 50 ml de cada una de las muestras de efluente.
19. Se agregaron 2 gotas de fenolftaleína a cada alícuota y titular con solución de NaOH 0.1 N, hasta la primera coloración rosa que persista durante 15 s con agitación.
20. Se anotó el volumen de NaOH gastado en cada titulación al 0.01 mL más cercano.

Figura 20. **Equipo para la evaluación de la capacidad de salt-splitting.**



Fuente: ASTM D 2187-94 (2004); Standard test methods for physical and chemical properties of particulate ion exchange resins; sección 36, Test method E – salt-splitting capacity of cation Exchange resin.

Figura 21. Diagrama de flujo de procedimiento “Capacidad de partición de una sal neutra”



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla XX. **Parámetros de control para determinar la capacidad de partición de una sal neutra por peso de resina húmeda.**

No. de muestra	Peso 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 salt-splitting (meq/g)
x1	mx1	N	vx1	V <sub>prom</sub>	C <sub>spprom</sub>
x2	mx2	N	vx2		
x3	mx3	N	vx3		

Fuente: elaboración propia.

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

No. de muestra	Porcentaje de agua retenida promedio (%)	Capacidad de salt-splitting (meq/g)	Capacidad de salt-splitting por gramo seco (meq/g)
x1	%	C <sub>sp1</sub>	C <sub>sps1</sub>
x2	%	C <sub>sp2</sub>	C <sub>sps2</sub>
x3	%	C <sub>sp3</sub>	C <sub>sps3</sub>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Parámetros de control para determinar la capacidad de partición de una sal neutra por milímetro de resina húmeda.**

No. de muestra	Densidad promedio (g/mL)	Capacidad de salt-splitting (meq/g)	Capacidad total de intercambio por mililitro de retrolavado (meq/g)
x1	d1	C <sub>ss1</sub>	C <sub>sppv1</sub>
x2	d2	C <sub>ss2</sub>	C <sub>sppv2</sub>
x3	d3	C <sub>ss3</sub>	C <sub>sppv3</sub>

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2. Alternativa de reciclaje de poliestireno expandido para producir una resina de recubrimiento

Se calculó el número de repeticiones que se deben de analizar para cada parámetro de calidad de la resina producida. Se realizaron pruebas preliminares del parámetro de sólidos totales que tiene el mayor impacto en las demás propiedades de los recubrimientos. Los resultados preliminares son:

Tabla XXIII. Pruebas preliminares Porcentaje de sólidos totales en las resinas de recubrimiento preparadas a partir de residuos de poliestireno expandido

Muestra	Porcentaje sólidos totales
1	53
2	52
3	50
4	52
5	52
6	52
7	51
8	52

Fuente: elaboración propia.

Se utilizó la ecuación de la figura 22, y con los resultados preliminares se obtienen los valores para determinar la cantidad de muestras a realizar, esto se muestra en la tabla siguiente.

Tabla XXIV. **Variables para determinar la cantidad de repeticiones**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<i>Nivel de confianza</i>	5%
<i>Z crítico</i>	2.38
<i>S (desviación estándar pruebas piloto)</i>	0.9 % (Pruebas piloto de laboratorio)
<i>d (nivel de precisión)</i>	±0.9 %

Fuente: elaboración propia.

$$n = \frac{2(2.38)^2 * 0.9^2}{0.9^2} = 11.33 = 12 \text{ repeticiones}$$

Se estableció que 12 repeticiones debían ejecutarse para las pruebas de los parámetros de calidad de la resina de recubrimiento.

A continuación se presentan las metodologías experimentales, su descripción y detalle. Así como las variables involucradas en los parámetros de análisis de cada prueba

- Evaluación de resina de recubrimiento: Porcentaje de sólidos totales
  - Variables del procedimiento

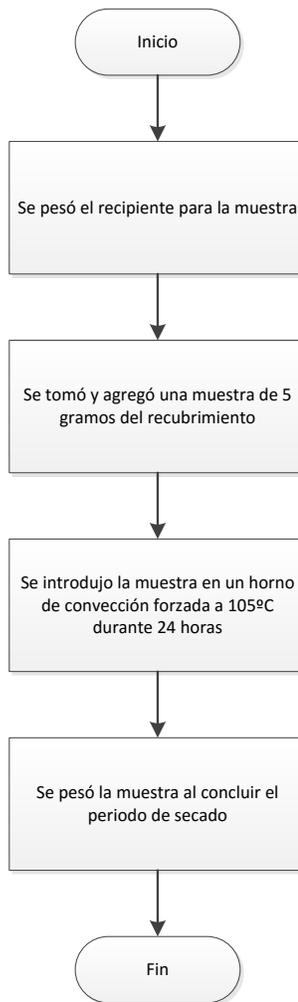
Tabla XXV. Descripción de las variables de control

No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Masa inicial	g		x		x	Masa inicial de resina
2	Temperatura	°C		x		x	Temperatura de secado
3	Tiempo	h		x		x	Tiempo de secado de muestra sin gas.
4	Masa final	g	x		x		Masa final de sólidos totales
<b>Var:</b> Variable <b>Const:</b> Constante <b>Dep:</b> Dependiente <b>Ind:</b> Independiente							

Fuente: elaboración propia.

- Procedimiento de evaluación del porcentaje de sólidos totales
  1. Se pesó el recipiente de la muestra.
  2. Se tomó una muestra de la resina de recubrimiento de 5 gramos
  3. Se introdujo la muestra en un horno de convección forzada a 105°C durante 24 horas
  4. Se pesó la muestra al concluir el periodo de secado

Figura 22. Diagrama de flujo de procedimiento “Porcentaje de sólidos totales”



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla XXVI. **Parámetros de control “Evaluación de resina de recubrimiento: porcentaje de sólidos totales”**

No. de muestra	Masa inicial (g)	Masa recipiente (g)	Masa final (g)	Masa sólidos (g)	Porcentaje de sólidos totales (%)	Porcentaje de sólidos totales promedio (%)
X <sub>1</sub>	m <sub>11</sub>	mr <sub>1</sub>	mf <sub>1</sub>	ms <sub>1</sub>	%S <sub>1</sub>	%S <sub>prom</sub>
X <sub>2</sub>	m <sub>12</sub>	mr <sub>2</sub>	mf <sub>2</sub>	ms <sub>2</sub>	%S <sub>2</sub>	
X <sub>3</sub>	m <sub>13</sub>	mr <sub>3</sub>	mf <sub>3</sub>	ms <sub>3</sub>	%S <sub>3</sub>	

Fuente: Elaboración propia.

- Evaluación de resina de recubrimiento: Peso específico
  - Variables del procedimiento

Tabla XXVII. **Descripción de las variables de control**

No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Masa cubeta	g		x		x	Masa estándar del equipo de medición
2	Volumen cubeta	mL		x		x	Volumen estándar del equipo de medición
3	Masa muestra	g	x		x		Masa muestra de recubrimiento
4	Densidad muestra	g/mL	x		x		Densidad de la resina de recubrimiento
5	Temperatura	°C	x		x		Temperatura de la resina de recubrimiento

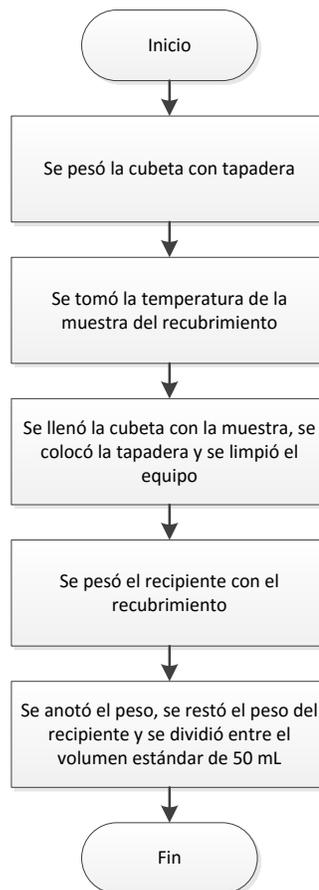
**Var:** Variable **Const:** Constante **Dep:** Dependiente **Ind:** Independiente

Fuente: elaboración propia.

○ Procedimiento de evaluación del peso específico

1. Se pesó la cubeta o instrumento con la tapadera.
2. Se tomó la temperatura del fluido.
3. Se llenó la cubeta con el fluido, se colocó la tapadera y se limpió el recipiente.
4. Se pesó el recipiente con el recubrimiento.
5. Se anotó el peso, se le restó el peso del recipiente y luego se dividió dentro de 50 mililitros, volumen estándar del método

Figura 23. **Diagrama de flujo de procedimiento “Porcentaje de sólidos totales”**



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla XXVIII. **Parámetros de control “Evaluación de la resina de recubrimiento: peso específico”**

No. de muestra	Masa recipiente (g)	Masa muestra y recipiente (g)	Masa muestra (g)	Volumen (mL)	Peso específico (g/mL)	Peso específico promedio (%)
X <sub>1</sub>	m <sub>11</sub>	mr <sub>1</sub>	mf <sub>1</sub>	ms <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>prom</sub>
X <sub>2</sub>	m <sub>12</sub>	mr <sub>2</sub>	mf <sub>2</sub>	ms <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	
X <sub>3</sub>	m <sub>13</sub>	mr <sub>3</sub>	mf <sub>3</sub>	ms <sub>3</sub>	d <sub>3</sub>	

Fuente: Elaboración propia.

- Evaluación de resina de recubrimiento: Viscosidad
  - Variables del procedimiento

Tabla XXIX. **Descripción de las variables de control**

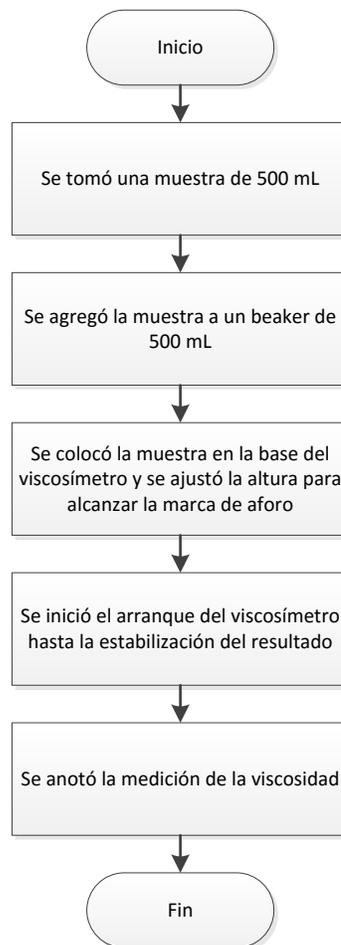
No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Volumen muestra	mL		x		x	Volumen de muestra de recubrimiento requerido para utilizar en el equipo
2	Velocidad aspa	rpm		x		x	Velocidad estándar en Viscosímetro
3	Viscosidad	cP	x		x		Viscosidad medida en el viscosímetro
4	Temperatura	°C	x		x		Temperatura de la muestra de recubrimiento

**Var:** Variable **Const:** Constante **Dep:** Dependiente **Ind:** Independiente

Fuente: elaboración propia.

- Procedimiento de evaluación de la viscosidad
1. Se tomó una muestra de 500 mL
  2. Se agregó a un beaker de 500 mL
  3. Se colocó en la base del viscosímetro y se introdujo la aguja del equipo hasta la marca de aforo.
  4. Se inició la rotación de la aguja hasta la estabilización de la lectura
  5. Se anotó la medición de la viscosidad

Figura 24. **Diagrama de flujo de procedimiento “Evaluación de la viscosidad en la resina de recubrimiento”**



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla XXX. **Parámetros de control “Evaluación de la resina de recubrimiento: viscosidad”**

No. de muestra	Temperatura muestra (°C)	Viscosidad (cP)	Viscosidad promedio (cP)
X <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>prom</sub>
X <sub>2</sub>	T <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	
X <sub>3</sub>	T <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	

Fuente: Elaboración propia.

- Evaluación de resina de recubrimiento: Brillo
  - Variables del procedimiento

Tabla XXXI. **Descripción de las variables de control**

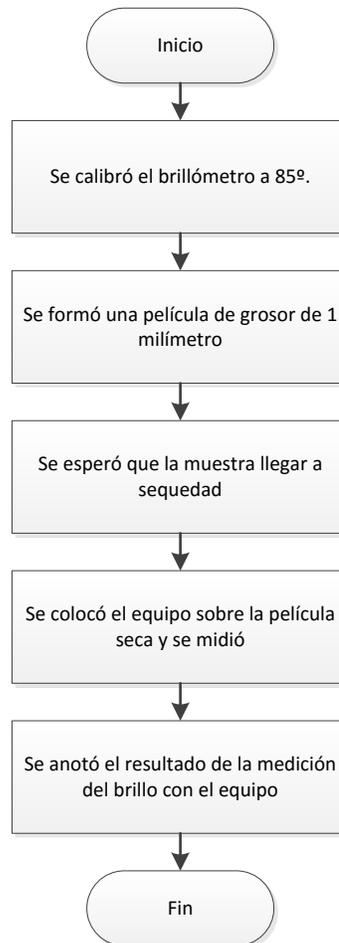
No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Volumen muestra	mL		x		x	Volumen de la muestra tomado para la prueba
2	Grosor película	mm		x		x	Grosor de la película para la medición
3	Brillo	°	x		x		Medición utilizando el equipo brillo metro
<b>Var:</b> Variable <b>Const:</b> Constante <b>Dep:</b> Dependiente <b>Ind:</b> Independiente							

Fuente: elaboración propia.

○ Procedimiento de evaluación del brillo

1. Se calibró el instrumento colocándolo a 85°, se utiliza para recubrimientos con alto brillo
2. Se formó una película con un grosor de 1 mili.
3. Se esperó que se seque la película
4. Se colocó el equipo sobre la película seca
5. Se anotó el resultado de la medición del brillo.

Figura 25. **Diagrama de flujo de procedimiento “Evaluación del brillo en la resina de recubrimiento”**



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla XXXII. **Parámetros de control “Evaluación de la resina de recubrimiento: brillo”**

No. de muestra	Brillo (°)	Brillo promedio (%)
X <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>prom</sub>
X <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	
X <sub>3</sub>	b <sub>3</sub>	

Fuente: Elaboración propia.

- Evaluación de resina de recubrimiento: Fineza
  - Variables del procedimiento

Tabla XXXIII. **Descripción de las variables de control**

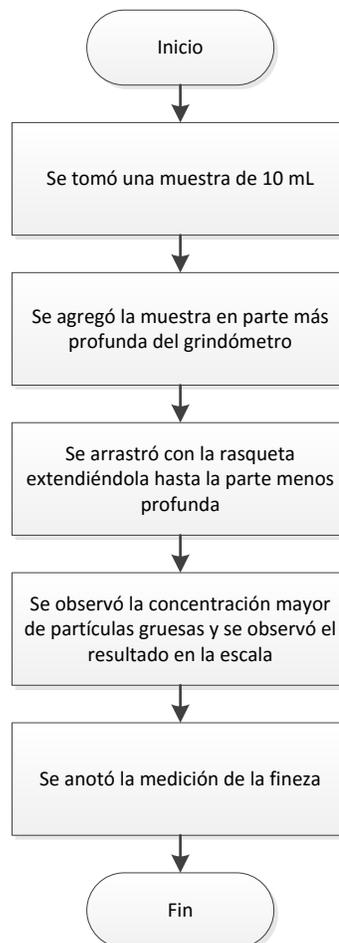
No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño		Tipo de variable		Descripción de la variable
			Var.	Const.	Dep.	Ind.	
1	Volumen muestra	mL		x		x	Volumen de muestra de recubrimiento requerido para utilizar en el equipo
2	Fineza	H	x		x		Medición directa del equipo
<b>Var:</b> Variable <b>Const:</b> Constante <b>Dep:</b> Dependiente <b>Ind:</b> Independiente							

Fuente: elaboración propia.

○ Procedimiento de evaluación de la fineza

1. Se tomó una muestra de 10 mL y se colocó en la parte de mayor profundidad del grindómetro
2. Se arrastró la muestra con la rasqueta extendiendo hacia la parte menos profunda
3. Se observó la concentración mayor de partículas gruesas
4. Se anotó la medición de la fineza obtenida con el grindómetro

Figura 26. **Diagrama de flujo de procedimiento “Evaluación de la fineza en la resina de recubrimiento”**



Fuente: elaboración propia.

- Tabulación y orden de la información

Tabla XXXIV. **Parámetros de control “Evaluación de la resina de recubrimiento: fineza”**

No. de muestra	Fineza (H)	Fineza promedio (H)
X <sub>1</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>prom</sub>
X <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	
X <sub>3</sub>	H <sub>3</sub>	

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Instrumentos y equipos utilizados

Tabla XXXV. Equipos utilizados en el marco experimental

Equipo	Marca/Modelo	Descripción
<p><b>Balanza analítica</b></p>  <p>Fuente: <a href="http://www.radwag.com/spanish/images/ps1_b.jpg">http://www.radwag.com/spanish/images/ps1_b.jpg</a> Consulta: noviembre 2014</p>	<p>Marca RADWAG Modelo WPS 750/C/1</p>	<p>Se utilizó para la medición de los pesos de todas las pruebas gravimétricas de la investigación.</p>
<p><b>Horno de calentamiento</b></p>  <p>Fuente: Laboratorio de Calidad Pinturas SEGA</p>	<p>Marca Grieve</p>	<p>Se utilizó para las pruebas gravimétricas para la determinación de contenido de sólidos en ambas alternativas.</p>
<p><b>Cubeta Gardner</b></p>  <p>Fuente: Laboratorio de Calidad Pinturas SEGA</p>	<p>Marca Gardco</p>	<p>Se utilizó para la medición de la densidad de las resinas de recubrimiento</p>

Fuente: elaboración propia.

Continuación Tabla XXVII.

<p><b>Grindómetro</b></p>  <p>Fuente: Laboratorio de Calidad Pinturas SEGA</p>	<p>Marca Hengman</p>	<p>Se utilizó el grindómetro para la medición de la fineza de las resinas de recubrimiento</p>
<p><b>Brillo metro</b></p>  <p>Fuente: Laboratorio de Calidad Pinturas SEGA</p>	<p>Marca IGT</p>	<p>Se utilizó para la medición del brillo de las resinas de recubrimiento</p>
<p><b>Bomba de vacío</b></p>  <p>Fuente:  <a href="http://www.rsulab.mx/images/bomba_felisa_large.jpg">http://www.rsulab.mx/images/bomba_felisa_large.jpg</a> Consulta:          noviembre 2014</p>	<p>Marca Cole-Parmer</p>	<p>Se utilizó en el procedimiento de sulfonación de la resina y los lavados de preparación.</p>

Fuente: elaboración propia.

Continuación Tabla XXVII.

<p><b>Bomba dosificadora con potenciómetro</b></p>  <p>Fuente: <a href="http://www.hannachile.com/componentes/com_virtuemart/shop_image/product/20121013092819-BLPUMP.jpg">http://www.hannachile.com/componentes/com_virtuemart/shop_image/product/20121013092819-BLPUMP.jpg</a> Consulta: noviembre 2014</p>	<p>Marca Hannah</p>	<p>Se utilizó para la preparación de las resinas de intercambio iónico, en la sulfonación del poliestireno.</p>
--	---------------------	---

Fuente: elaboración propia.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. Evaluar la viabilidad de reciclar poliestireno expandido para producir una resina de intercambio iónico

- Evaluar las características visuales de la resina de intercambio iónico producida a través de la sulfonación de los residuos de poliestireno expandido.

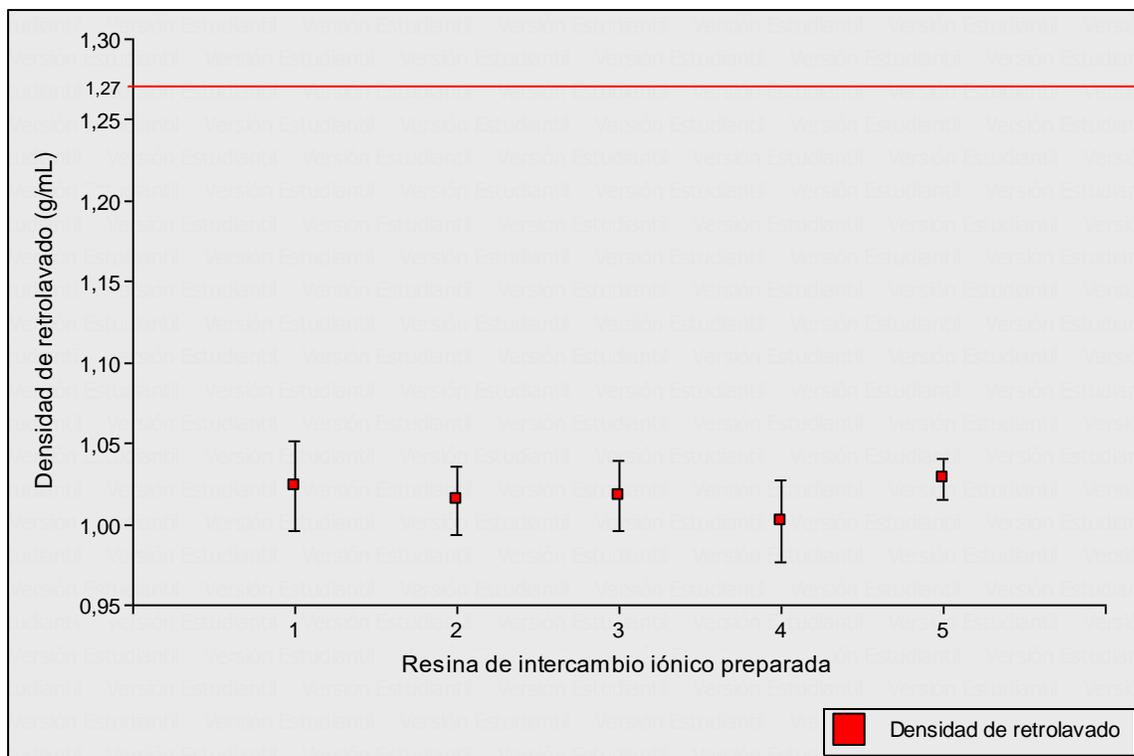
Tabla XXXVI. Ponderación de las características visuales de la resina de intercambio iónico producida

Característica visual	Reactivo para sulfonación	
	Ácido sulfúrico concentrado	Óleum / ácido sulfúrico concentrado
Fotografía resina obtenida		
Superficie definida de la resina	1	4
Color (uniformidad)	3	3
Forma definida (uniformidad)	2	4
Consistencia	1	4
<b>TOTAL</b>	<b>7</b>	<b>11</b>
<i>Escala de calificación:</i>	5: Excelente desempeño 4: Buen desempeño 3: Desempeño promedio 2: Mal desempeño 1: Pobre desempeño	

Fuente: Elaboración propia.

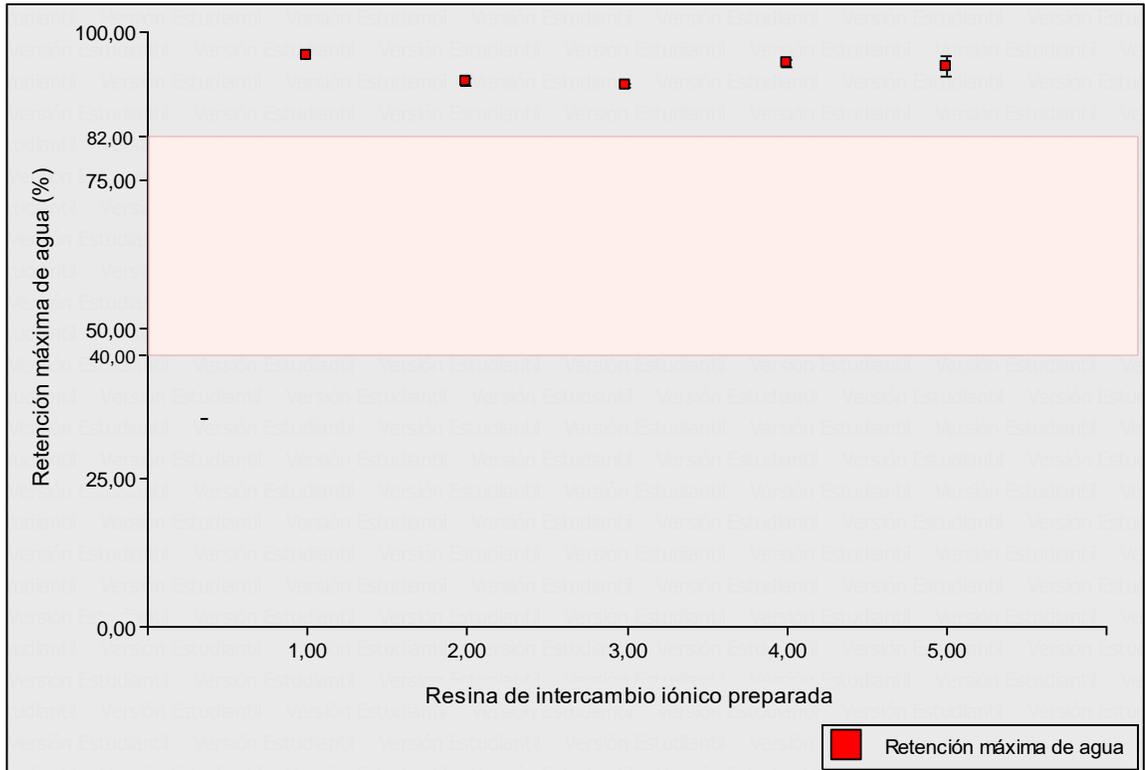
- Determinar la densidad y retención máxima de agua de la resina de intercambio iónico producida a través de la sulfonación de los residuos de poliestireno expandido.

Figura 27. **Densidad de retrolavado de resinas de intercambio iónico preparadas a partir del reciclaje de poliestireno expandido**



Fuente: elaboración propia.

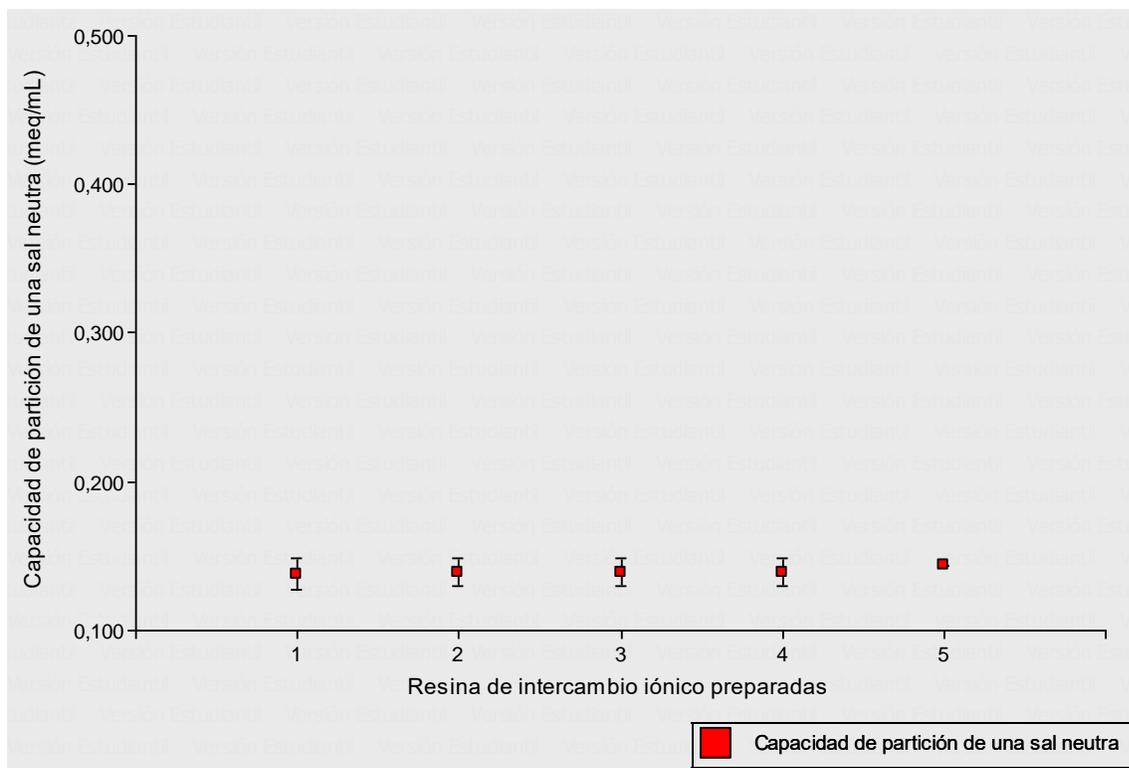
Figura 28. **Porcentaje de retención máxima de agua de resinas de intercambio iónico preparadas a partir del reciclaje de poliestireno expandido**



Fuente: elaboración propia.

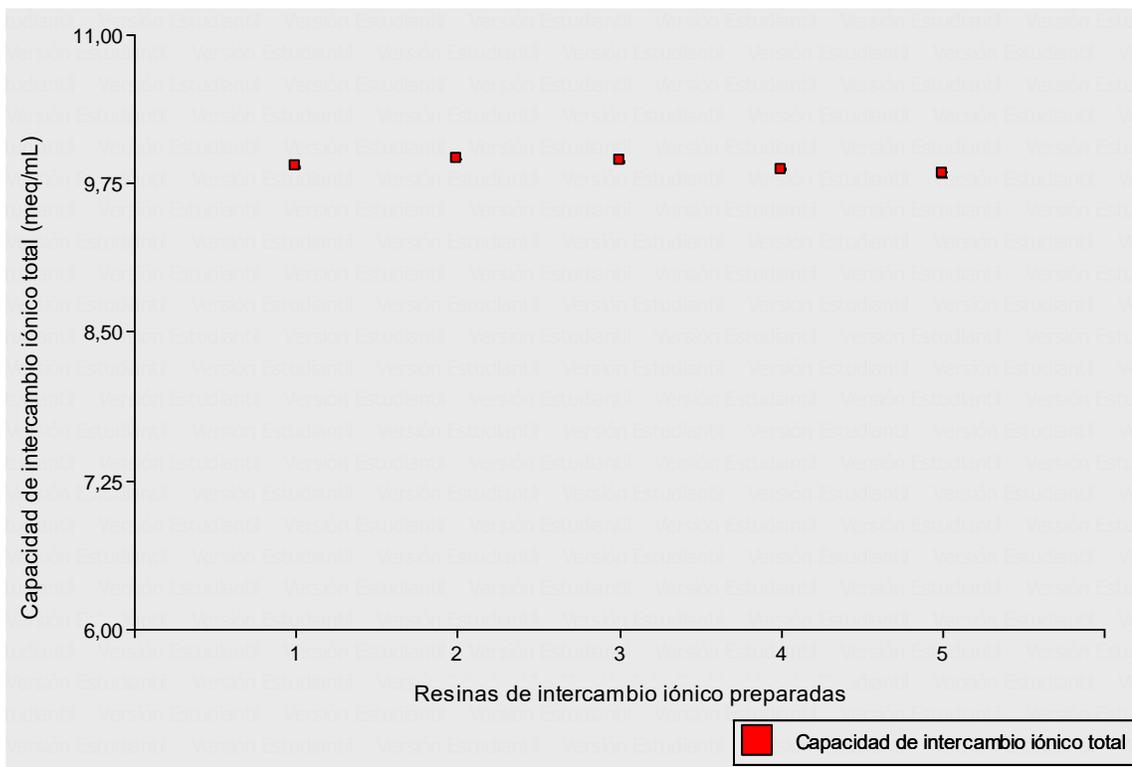
- Determinar la capacidad de partición de una sal neutra y la capacidad de intercambio iónico total de la resina de intercambio iónico producida a través de la sulfonación de los residuos de poliestireno expandido.

Figura 29. **Capacidad de partición de una sal neutra de las resinas de intercambio iónico preparadas a partir del reciclaje de poliestireno expandido**



Fuente: elaboración propia.

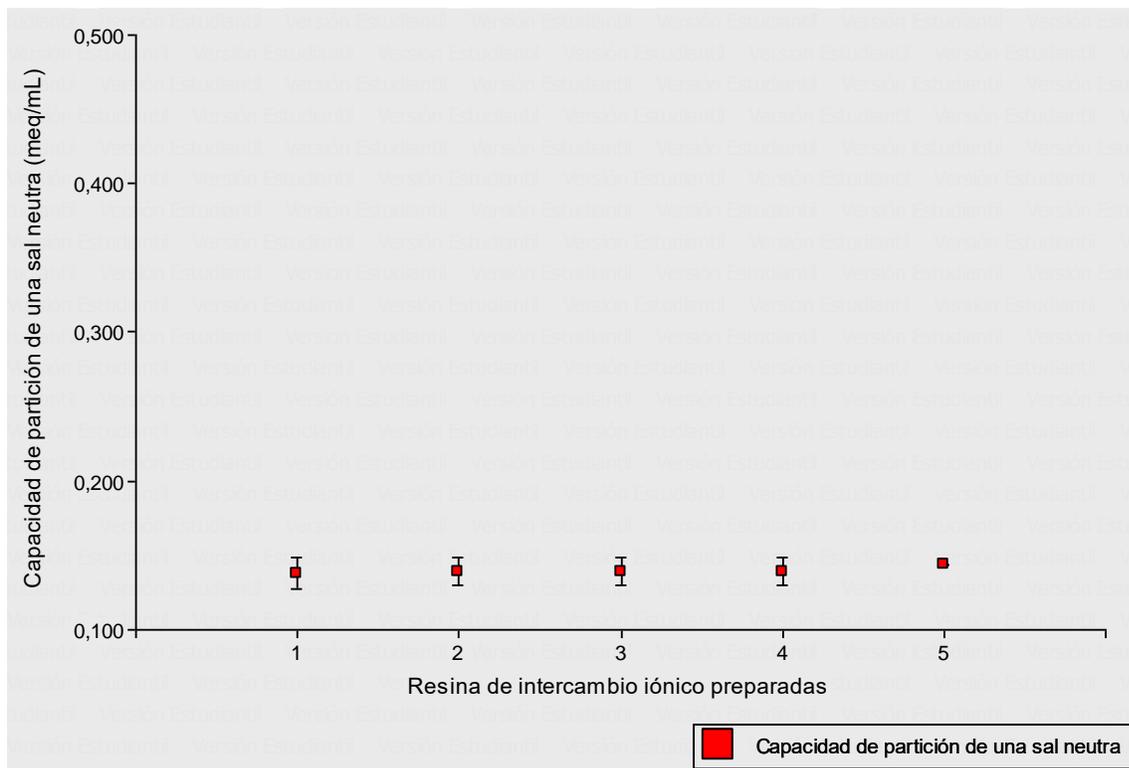
Figura 30. **Capacidad de intercambio iónico total de las resinas de intercambio iónico preparadas a partir del reciclaje de poliestireno expandido**



Fuente: elaboración propia.

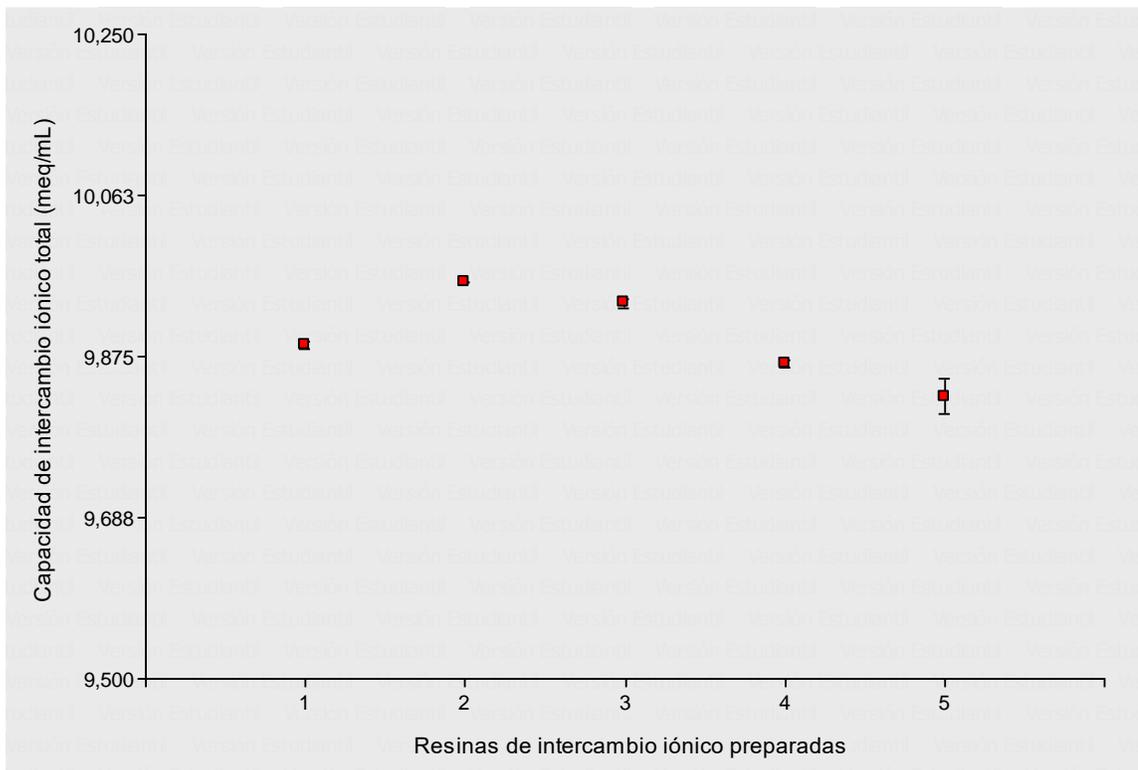
- Analizar la regeneración de la resina de intercambio iónico a través de sus características químicas

Figura 31. **Capacidad de partición de una sal neutra de la resina de intercambio iónica regenerada**



Fuente: elaboración propia.

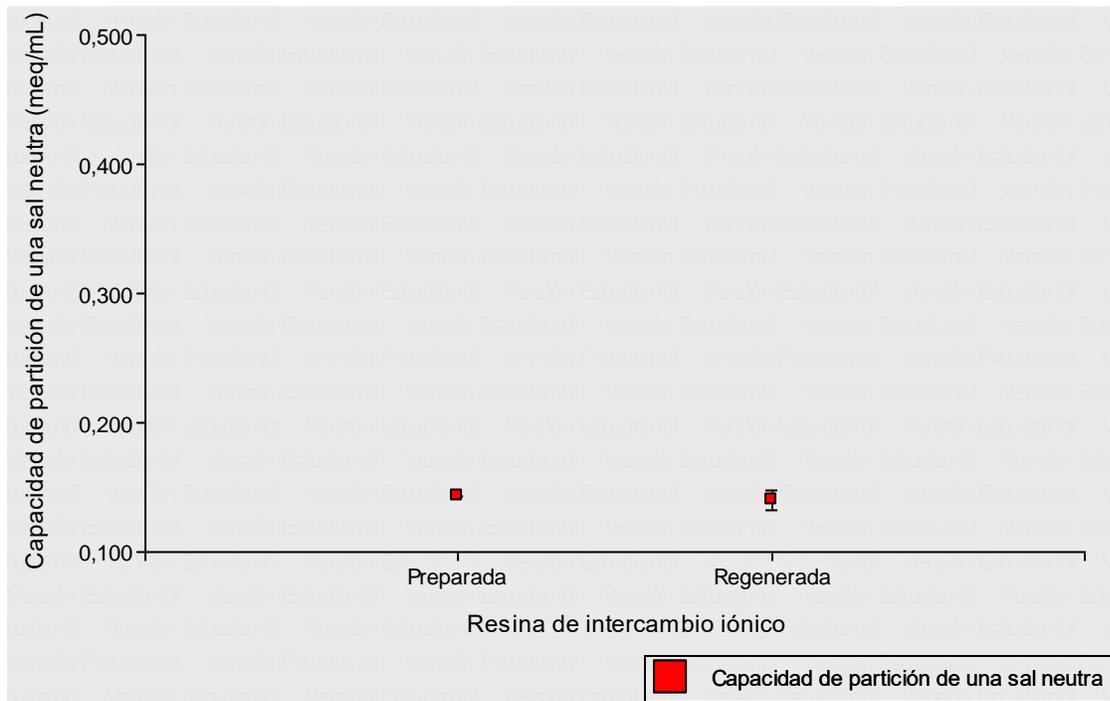
Figura 32. **Capacidad de intercambio iónico total de la resina de intercambio iónico regenerada**



Fuente: elaboración propia.

- Comparar las características químicas de la resina de intercambio iónica producida y regenerada

Figura 33. **Capacidad de partición de una sal neutra de resina de intercambio iónico original y regenerada**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Análisis de la varianza capacidad de partición de una sal neutra entre resina de intercambio iónico original y regenerada**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Nivel de significación
Modelo.	7,8E-05	1	7,8E-05	2,99	0,0910	0,05
Resina IO	7,8E-05	1	7,8E-05	2,99	0,0910	0,05
Error	1,2E-03	44	2,6E-05			
Total	1,2E-03	45				

Fuente: Elaboración propia.

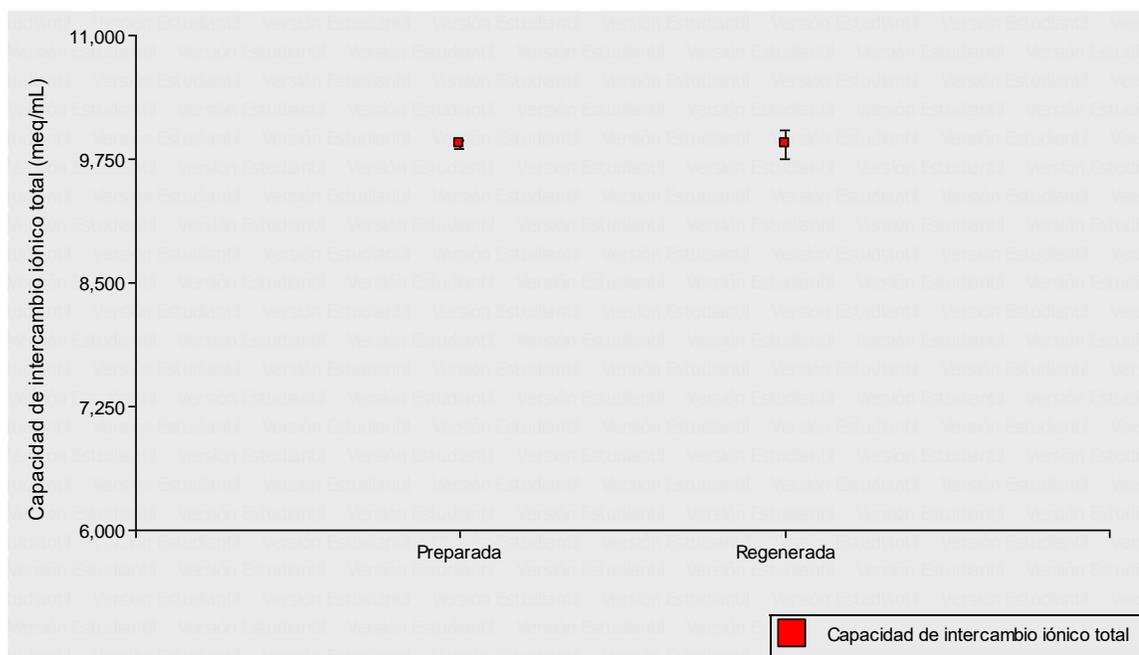
Tabla XXXVIII. Prueba LSD-Fisher comparación capacidad de partición de una sal neutra entre la resina de intercambio iónico original y regenerada

Resina de IO	Medias	n	E.E.	
Regenerada	0,14	23	1,1 E-3	A
Original	0,14	23	1,1 E-3	A

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Capacidad de intercambio iónico total de las resinas de intercambio iónico original y regenerada



Fuente: Elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Análisis de la varianza de la comparación de capacidad de intercambio iónico total de las resinas de intercambio iónico original y regenerada**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Nivel de significación
<b>Modelo.</b>	2,6E-04	1	2,6E-04	0,02	0,8815	0,05
<b>Resina</b>	2,6E-04	1	2,6E-04	0,02	0,8815	0,05
<b>Error</b>	0,54	47	0,01			
<b>Total</b>	0,54	48				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XL. **Prueba LSD-Fisher de la comparación de capacidad de intercambio iónico total de las resinas de intercambio iónico original y regenerada**

Tipo residuo	Medias	n	E.E.	
Regenerada	9,90	25	0,02	A
Original	9,90	24	0,02	A

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Fuente: Elaboración propia.

**4.2. Evaluar la viabilidad de reciclar poliestireno expandido para producir una resina de recubrimiento**

- Analizar la afinidad del poliestireno expandido con solventes comerciales para producir una resina de recubrimiento

Tabla XLI. **Solubilidad de poliestireno expandido en solventes orgánico**

SOLVENTE	TIPO DE RESIDUO		
	1	2	3
Xileno	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>
Tolueno	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>
Metil isobutil cetona	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>
Metil etil cetona	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>
Alcohol isopropílico	Negativo	Negativo	Negativo
Acetato de butilo	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>
Butil cellosolve	Negativo	Negativo	Negativo
Thinner	Negativo	<b>Positivo</b>	<b>Positivo</b>
Solvente mineral	Negativo	Negativo	Negativo

Fuente: elaboración propia.

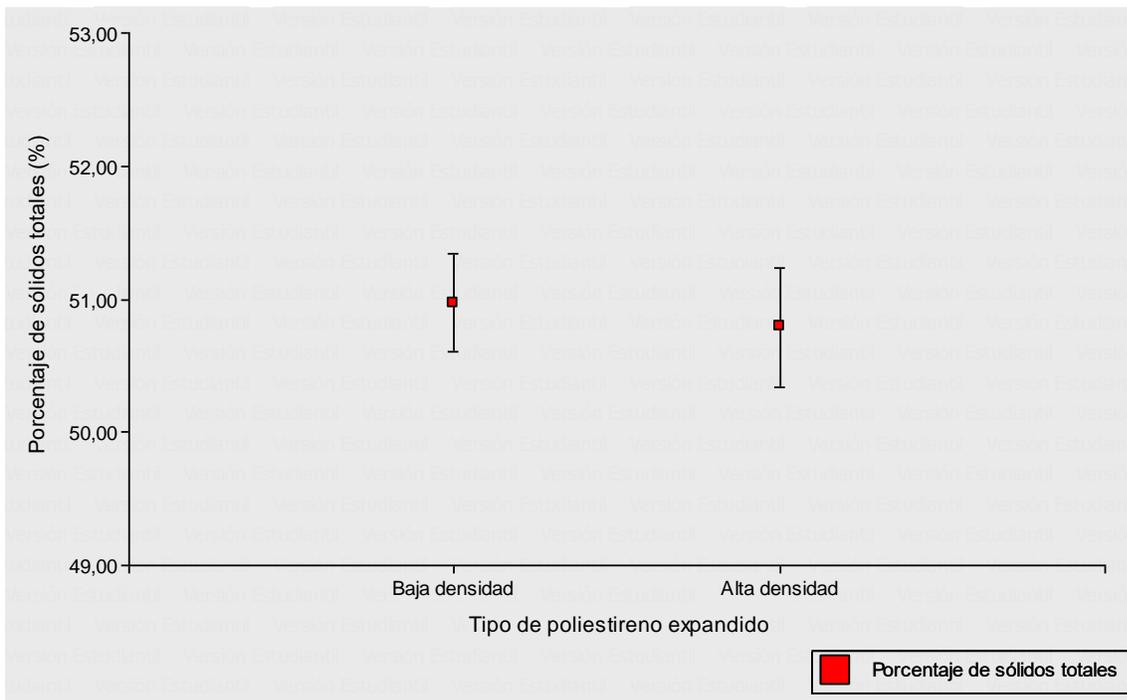
**Residuos disueltos en Xileno**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos, CII, USAC.

- Determinar las propiedades de porcentaje de sólidos totales, densidad y viscosidad de las resinas de recubrimiento preparadas a partir de los residuos de poliestireno expandido.

Figura 35. **Porcentaje de sólidos totales de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido**



Fuente: Elaboración propia.

Tabla XLII. **Análisis de la varianza del porcentaje de sólidos totales de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido**

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>	<b>Nivel de significación</b>
<b>Modelo</b>	0,20	1	0,62	1,18	0,2885	0,05
<b>Resina</b>	0,20	1	0,20	1,18	0,2885	0,05
<b>Error</b>	3,75	22	0,17			
<b>Total</b>	3,95	23				

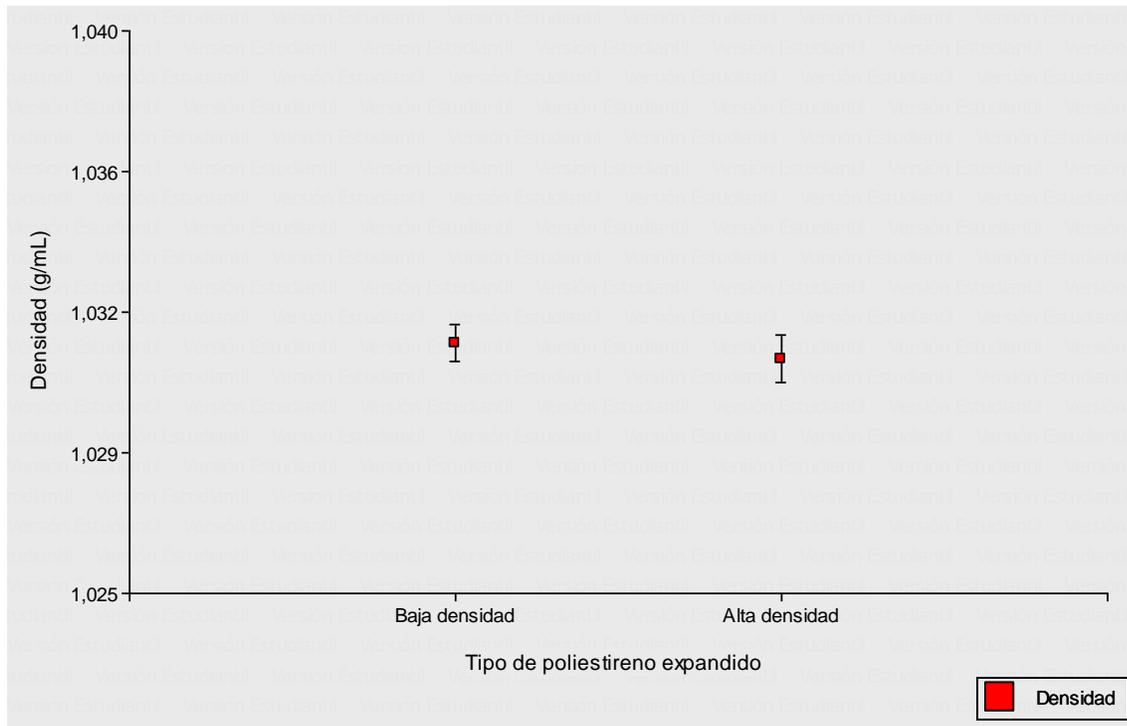
Fuente: Elaboración propia.

Tabla XLIII. **Prueba LSD-Fisher del porcentaje de sólidos totales de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido**

<b>Tipo residuo</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
Alta densidad	50,79	12	0,12	A
Baja densidad	50,97	12	0,12	A
*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )				

Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. **Densidad de resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido utilizado**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Análisis de la varianza de la densidad de las resinas de recubrimiento preparadas**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Nivel de significación
<b>Modelo</b>	1,0E-06	1	1,0E-06	3,31	0,0824	0,05
<b>Resina</b>	1,0E-06	1	1,0E-06	3,31	0,0824	0,05
<b>Error</b>	6,9E-06	22	3,1E-07			
<b>Total</b>	8,0E-06	23				

Fuente: Elaboración propia.

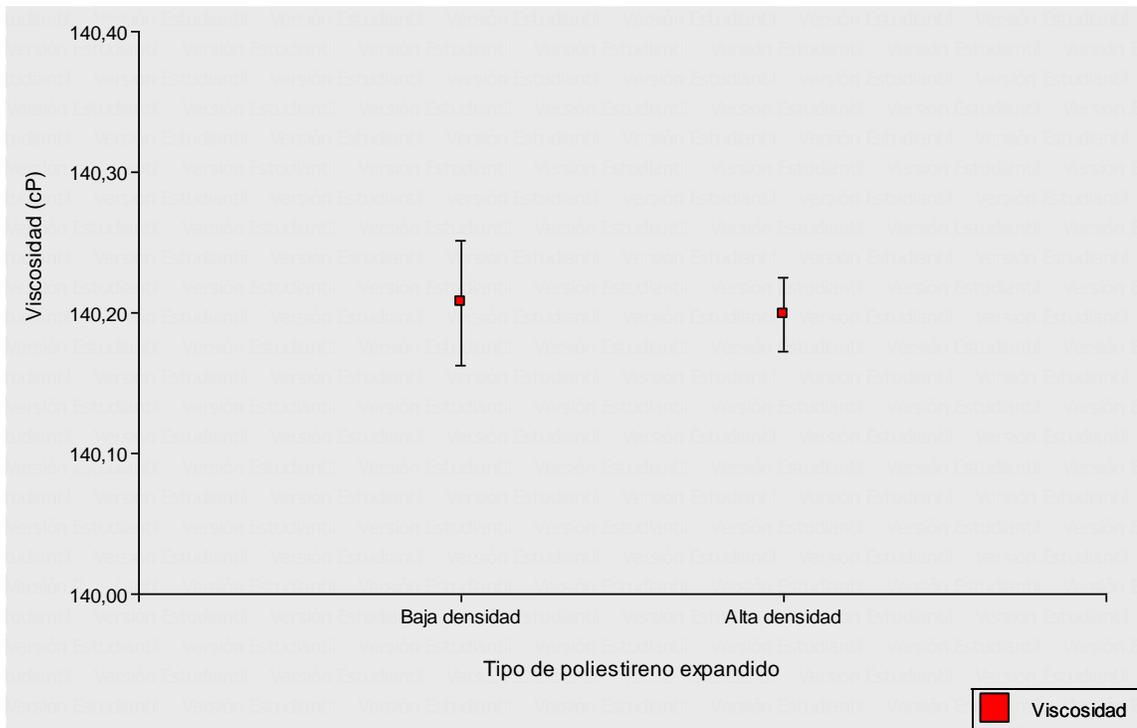
Tabla XLV. Prueba LSD-Fisher de la densidad de las resinas de recubrimiento preparadas

Tipo residuo	Medias	n	E.E.	
Alta densidad	1,03	12	1,6E-04	A
Baja densidad	1,03	12	1,6E-04	A

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Viscosidad de resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido



Fuente: Elaboración propia.

Tabla XLVI. **Análisis de la varianza de la viscosidad de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Nivel de significación
<b>Modelo</b>	4,2E-04	1	4,2E-04	0,31	0,5820	0,05
<b>Resina</b>	4,2E-04	1	4,2E-04	0,31	0,5820	0,05
<b>Error</b>	0,03	22	1,3E-03			
<b>Total</b>	0,03	23				

Fuente: Elaboración propia.

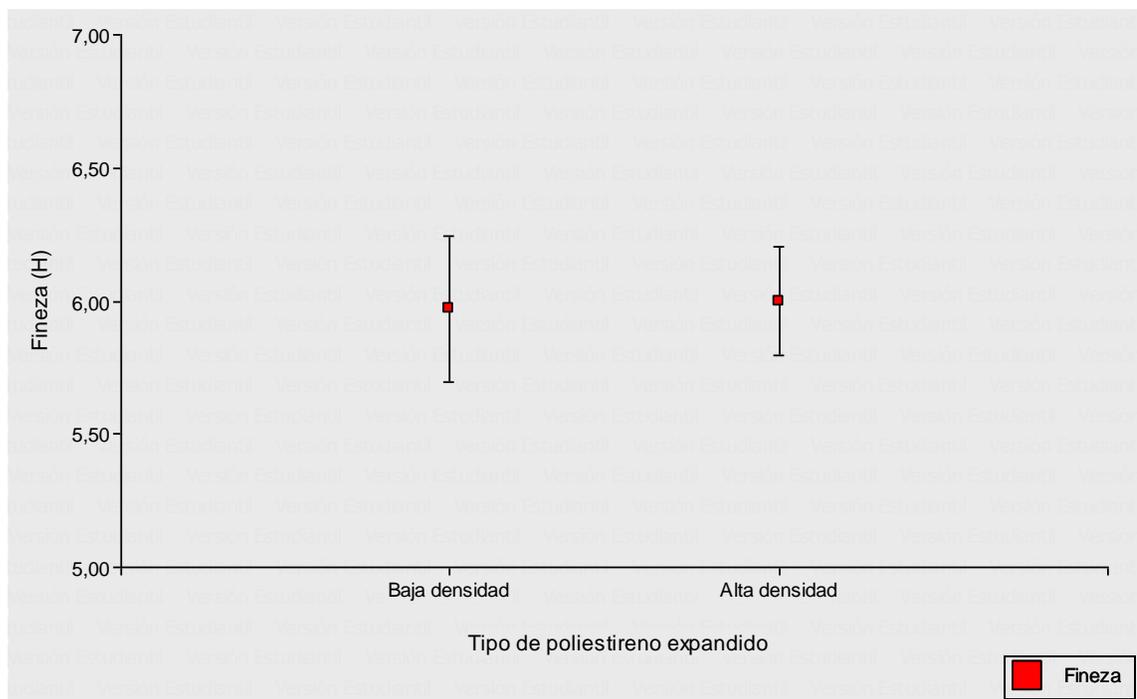
Tabla XLVII. **Prueba LSD-Fisher de la viscosidad de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido**

Tipo residuo	Medias	n	E.E.	
Alta densidad	140,20	12	0,01	A
Baja densidad	140,21	12	0,01	1
*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )				

Fuente: Elaboración propia.

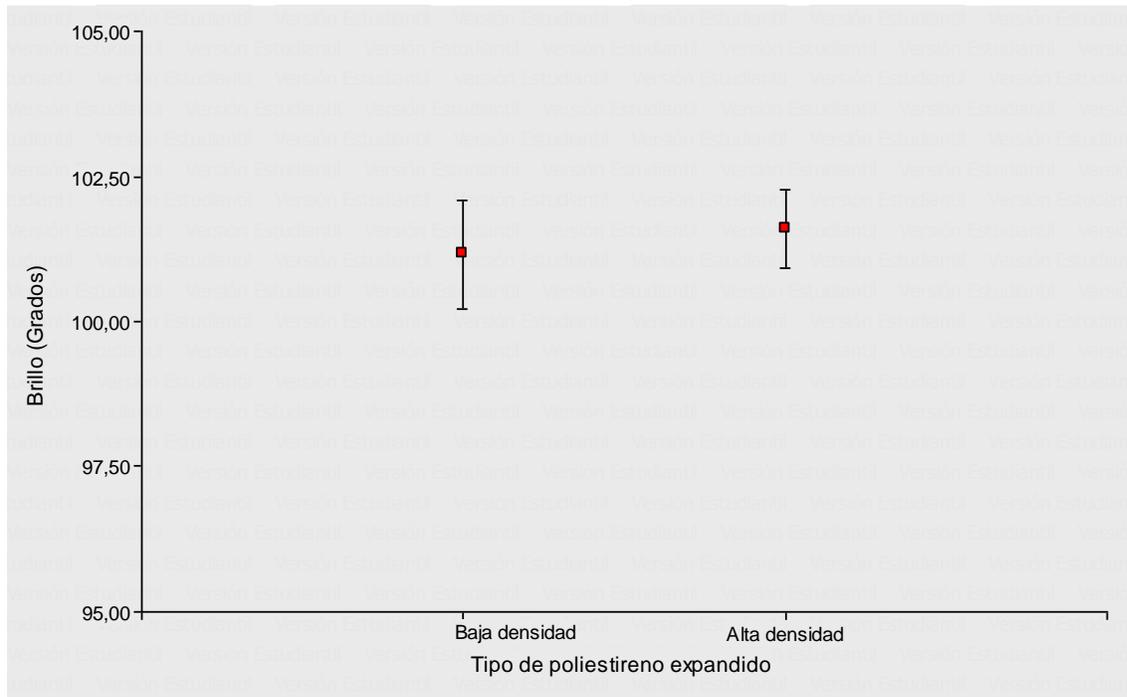
- Determinar las propiedades de fineza y brillo de las resinas de recubrimiento preparadas a partir de los residuos de poliestireno expandido.

Figura 38. **Fineza de resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido**



Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. **Brillo de resinas de recubrimiento según el tipo de residuo de poliestireno expandido**



Fuente: Elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Análisis de la varianza del brillo de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Nivel de significación
<b>Modelo</b>	1,16	1	1,16	1,75	0,2001	0,05
<b>Resina</b>	1,16	1	1,16	1,75	0,2001	0,05
<b>Error</b>	14,65	22	0,67			
<b>Total</b>	15,81	23				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XLIX. **Prueba LSD-Fisher del brillo de las resinas de recubrimiento preparadas según el tipo de residuo de poliestireno expandido**

Tipo residuo	Medias	n	E.E.	
Alta densidad	101,15	12	0,24	A
Baja densidad	101,59	12	0,24	A
*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )				

Fuente: Elaboración propia.

- Establecer con respecto de las propiedades determinadas la funcionalidad del recubrimiento preparado.

Propiedad	Resina de recubrimiento preparada	Pintura	Barniz brillante	Anticorrosivo	Impermeabilizante
<b>Sólidos totales</b>	50 – 60%	1	1	1	1
<b>Viscosidad</b>	Media	1	1	1	1
<b>Brillo</b>	Alto	1	1	0	0
<b>Color</b>	Transparente	0	1	0	0
<b>Requerimiento especial</b>	--	Pigmentos	--	Pigmentos	Elasticidad e interperismo
<b>TOTAL</b>	--	3	4	2	2
<i>Escala de calificación:</i> 1: Propiedad adecuada 0: Propiedad no adecuada					

Fuente: elaboración propia.

- Establecer los costos del reciclaje de las dos alternativas de reciclaje de poliestireno expandido a escala laboratorio

Tabla L. **Costos asociados a la alternativa de reciclaje para producir una resina de recubrimiento**

<b>Costos variables</b>	<b>(Q/kg<sub>reciclado</sub>)</b>
Reactivos	
Xileno	27,72
Envase	5,33
<b>Total</b>	<b>33,05</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Costos asociados a la alternativa de reciclaje para producir una resina de intercambio iónico**

<b>Costos fijos</b>	<b>(Q)</b>
Equipos de laboratorio	
Cristalería	
Beaker 600 mL	45,00
Condensador de serpentín	905,00
Balón esmerilado	225,00
Termómetro	80,00
Plancha de calentamiento	3600,00
Envase de almacenamiento	10,00
<b>Total</b>	<b>4865,00</b>
<b>Costos variables</b>	<b>(Q/kg<sub>reciclado</sub>)</b>
Reactivos	
Ácido sulfúrico concentrado	1123,20
Ácido sulfúrico fumante	2190,00
Hidróxido de sodio	1833,33
Agua desmineralizada	1233,33
<b>Total</b>	<b>6379,87</b>

Fuente: elaboración propia.



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de esta investigación fue la evaluación de dos alternativas propuestas para el reciclaje de los residuos de poliestireno expandido, también conocido como duroport. La idea principal es el aprovechamiento de las características del polímero base de este residuo, el poliestireno, para la preparación de dos productos, el primero una resina de intercambio iónico y el segundo una resina de recubrimiento.

El proyecto nace de la necesidad de reducir el impacto en el ambiente de este tipo de residuo. Como se explicó anteriormente, el poliestireno expandido, es ampliamente utilizado en la industria de la construcción, de los empaques y embalajes y por ende, son estas mismas industrias las que generan los grandes volúmenes de residuos que generalmente son dispuestos en los vertederos municipales o los basureros clandestinos.

A pesar de que estos residuos tienen una gran capacidad de ser aprovechados, su mala gestión y disposición final, hacen que se incremente el volumen de residuos generados, además que sus características de bajo peso y flotabilidad les permiten transportarse sin dificultad. Sumado a esto, el poliestireno expandido no es biodegradable, pudiendo permanecer por grandes periodos de tiempo en el ambiente.

Para evitar esto, se debe promover la clasificación de residuos, su recolección y muy importante su disposición final. Siendo en esta etapa donde se pueden implementar las dos opciones evaluadas en este proyecto como alternativas de disposición de este tipo de residuos.

Para la evaluación experimental, se utilizaron dos tipos de residuos, poliestireno de alta densidad y de baja densidad. Estos se diferencian únicamente en el nivel de compresión del poliestireno expandido en la fabricación de los productos finales.

Se inició el marco experimental con el pre-tratamiento de los residuos, que consistió básicamente en la modificación de las propiedades físicas de los residuos. Primero, se sometieron a un proceso de trituración y reducción de tamaño, para luego ser manipulados directamente en la alternativa de producción de un recubrimiento. Mientras que para la alternativa de la resina de intercambio iónico, posterior a la reducción de tamaño, se somete a un proceso de desgasificación que consiste en un lavado con acetona diluida al 60%, donde se eliminó el gas contenido entre las esferas de poliestireno expandido.

Para la evaluación del primer objetivo y la determinación de la viabilidad de reciclar poliestireno expandido para preparar una resina de intercambio iónico se procedió a evaluar las características visuales así como las propiedades fisicoquímicas de las resinas sulfonadas, siendo la de mayor importancia la capacidad de intercambio iónico.

El poliestireno, por su estructura básica, no es capaz de promover el intercambio iónico ya que posee cadenas alifáticas y grupos aromáticos que no poseen grupos activos que permitan el intercambio de iones. Además, este material es fuertemente hidrofóbico por lo que no aceptaría la interacción con las soluciones acuosas que se pretenden tratar. Para ello, es necesario modificar la estructura básica del poliestireno, mediante un proceso de sulfonación, que consiste en una reacción electrofílica de sustitución, donde el grupo bisulfito  $\text{-HSO}_3$  se fija a un carbono del anillo aromático del estireno. Proveyendo así las características polares y los sitios activos requeridos.

Se inició con la preparación de las resinas de intercambio iónico, que consiste en la sulfonación de la matriz polimérica de poliestireno obtenida de los residuos del poliestireno expandido. Para esto, el procedimiento consistió en someter los residuos pre-tratados a un baño ácido con reflujo durante 2 horas a una temperatura de 80 grados Celsius.

En la experimentación se probaron dos soluciones ácidas para preparar la resina, una consistente en ácido sulfúrico grado reactivo (98 por ciento) y la segunda una mezcla ácido sulfúrico fumante (óleum) y ácido sulfúrico concentrado con concentraciones de 90 y 10 por ciento en volumen respectivamente. Se analizaron las características visuales, como se observa en la Tabla XXXVI, mediante las cuales se puede observar la estabilidad y uniformidad de la resina obtenida.

Se estableció una escala de calificación que se muestra en la misma tabla y se obtuvo que la resina preparada con la mezcla de ácidos presenta las mejores características visuales, como se esperaba. La sulfonación con el ácido sulfúrico concentrado obtuvo baja puntuación en los tres aspectos relacionados a la estructura de la resina obtenida. Se observó que la resina no presentó la forma de perlas, su consistencia era fluida y no se lograba la eliminación del agua en exceso sin afectar la resina. Mientras que la resina preparada con la mezcla de ácidos presentó la forma esférica esperada, una superficie y consistencia uniforme, el único parámetro de desempeño medio fue el color, ya que como se observa en la fotografía, este no era uniforme. Con ello, se seleccionó dicho procedimiento para la preparación de las resinas a evaluar.

Se prepararon las resinas de intercambio iónico con el procedimiento seleccionado y se procedió a la evaluación de las propiedades fisicoquímicas utilizando para ello la normativa ASTM D 2187, donde se presentan las pruebas y métodos para evaluar las resinas catiónicas de intercambio iónico.

Las resinas sulfonadas, se clasifican como resinas catiónicas de ácido fuerte, y comercialmente existen teniendo como base un copolímero de poliestireno y divinilbenceno. Por ello, se van a comparar las propiedades obtenidas de la experimentación con los datos técnicos de las resinas comerciales que se presentan en la Figura 13.

La primera propiedad que se determinó es la densidad, esta es medida cuando la resina se encuentra en su contenido máximo de retención de agua. Para ello, se mantiene un flujo constante de agua a través de una masa determinada de resina, luego se restringe el flujo de agua, se permite que la resina sedimente y se hace la medición del volumen ocupado por ella, obteniendo así el valor de la densidad.

Según se observa en la Figura 27, las cinco muestras preparadas presentan valores semejantes entre un rango de 1,00 a 1,03 g/mL, todos los valores con un coeficiente de variación del 2 por ciento. Se observa que el valor de comparación de densidad promedio de resinas catiónicas comerciales es de 1,27 g/mL, donde se observa una notable diferencia del 19 por ciento. Además, es de importancia mencionar que la densidad teórica del poliestireno se mantuvo.

En la Figura 28, se observan los resultados del parámetro de retención máxima de agua, esta prueba lo que busca es determinar la cantidad de agua que puede ser retenida por una resina y se analiza a través de la técnica de

gravimetría donde una masa de resina se lleva a sequedad durante un periodo de tiempo. La diferencia de peso indica la cantidad máxima de agua que es retenida por la resina. Durante la experimentación se observó que la resina sólida restante tras la prueba era realmente pobre en masa y los resultados cuantificados lo confirmaron.

Las cinco muestras preparadas obtuvieron entre 90 y 96 por ciento de retención máxima de agua, se observa una incerteza mayor entre estos resultados de las repeticiones. Este parámetro nos garantiza también que la sulfonación si ocurrió ya que acepta agua, es decir, el material es hidrofílico. Esto permitirá que el efluente de interés este en contacto con los sitios activos de la resina para producir el intercambio iónico.

Al comparar el rango teórico de retención máxima de agua de las resinas comerciales con los obtenidos en la experimentación, se observa que todos los resultados son mayores a este. Las resinas catiónicas comerciales presentan porcentajes entre el 40 y 82 por ciento de retención de agua, valores por debajo de los obtenidos en las resinas preparadas.

Los resultados obtenidos de la densidad y la retención máxima de agua de la resina de intercambio iónico preparadas a partir de los residuos de poliestireno expandido y su comparación con los valores técnicos de las resinas comerciales demuestran claramente que la diferenciación es causada por la estructura final del producto. Como se mencionó anteriormente, las resinas catiónicas comerciales, son resinas sulfonadas de un copolímero estireno-divilbenceno, que durante el proceso de polimerización produce la conexión y entrecruzamiento entre las moléculas de estireno.

Este entrecruzamiento causa que la resina este mas condensada y la estructura final más consistente, por lo que se denota en los resultados obtenidos. A diferencia de la cantidad de masa por volumen en las resinas comerciales, las resinas producidas no garantizan el proceso de entrecruzamiento que pudiese haber por el baño ácido. Esto también se refleja en la cantidad de agua que puede ser absorbida, en la resina comercial es menor que la producida a partir de los residuos de poliestireno, ya que la porosidad y el espacio libre disponible es menor en cada perla de resina.

A pesar de las diferencias observadas en las propiedades físicas de las resinas producidas no se puede determinar su eficacia hasta evaluar sus propiedades químicas de intercambio iónico. Los dos parámetros que se evaluaron fueron la capacidad de partición de una sal neutra y la capacidad de intercambio iónico total.

La primera prueba, partición de una sal neutra, mide la cantidad de mili equivalentes de hidrogeno intercambiable en una resina de intercambio catiónico suficientemente ácida para fraccionar sales neutras. Según la norma antes mencionada, esta prueba es específica para identificar grupos sulfónicos de resinas catiónicas.

La capacidad de partición de una sal neutra de las resinas de intercambio iónico producidas es un promedio de 0,142 mili equivalentes por mililitro de resina húmeda. Se observa poca variación entre los resultados de las repeticiones ejecutadas, esto verifica que en efecto existen grupos sulfónicos actuando en la resina producida y que son capaces de partir una sal neutra.

La segunda prueba de eficacia del producto, es la capacidad de intercambio iónico total, esta indica la cantidad total de mili equivalentes de

hidrógeno intercambiable en una resina de intercambio iónica. Esta prueba consiste en convertir la resina a su forma hidrogenada, la cual se equilibra con un exceso conocido de hidróxido de sodio en presencia de cloruro de sodio y se titula el ion hidroxilo en exceso con ácido clorhídrico estándar. Esta diferencia permite determinar la cantidad de sitios activos presentes en la resina.

En la Figura 30 se observa que la capacidad de intercambio iónico total de las resinas producidas se encuentran entre 9,83 y 9,96 mili equivalentes por mililitro de resina húmeda con un coeficiente de variabilidad del 0,5 por ciento, lo que muestra la poca variación entre los resultados.

Los resultados de la capacidad de partición de una sal neutra y la capacidad de intercambio iónico total, demuestran que la resina producida si es capaz de intercambiar iones de soluciones acuosas, es decir, existen los sitios activos en la resina producida. Esto nos permite establecer que esta alternativa de reciclaje de los residuos de poliestireno expandido es viable.

Una vez utilizada y agotada la resina de intercambio iónico, se somete a un proceso de regeneración, este es el proceso inverso del intercambio iónico y busca devolver a la resina su capacidad inicial de intercambio. Por ello, el siguiente objetivo buscó determinar las propiedades químicas de la resina posterior a su regeneración y determinar si después de su primera utilización, la resina tiene la capacidad de mantener su estructura y por ende su funcionamiento de intercambio catiónico.

La regeneración de la resina de intercambio catiónico consistió en el lavado de la resina con un ácido orgánico diluido, esto para obtener nuevamente los sitios activos del hidrógeno intercambiable en la resina.

En la Figura 31 se observa que la capacidad de partición de una sal neutra de la resina de intercambio iónico regenerada se encuentra entre los valores de 0,139 y 0,143 mili equivalentes por mililitro de resina húmeda. Se observa un ligero descenso con respecto de los valores obtenidos de la resina original. Y en la Figura 32, se observa que la capacidad de intercambio iónico total también se mantiene entre 9,6 y 10 miliequivalentes por mililitro de resina húmeda.

Se procedió a comparar los resultados de las dos propiedades químicas de la resina de intercambio iónico y comprobar estadísticamente si las medias de los resultados presentaban diferencias significativas.

En la Figura 33, se observa que el promedio de la capacidad de partición de una sal neutra en la resina de intercambio iónico original es de 0,139 miliequivalentes por mililitro, mientras que posterior a su regeneración es de 0,137 miliequivalentes por mililitro, ambos resultados con una desviación estándar de 0,01 miliequivalentes por mililitro. En la Tabla XXXVII y XXXVIII se determina mediante el análisis de la varianza y la prueba LSD-Fisher las medias de la capacidad de partición de la sal neutra no presentan diferencias significativas entre la resina original y la regenerada.

En la Figura 34 se observa la comparación del promedio de las capacidades de intercambio iónico total, tanto de la resina de intercambio iónico original y la regenerada, siendo 9,987 y 9,904 miliequivalentes por mililitro, respectivamente. En las tablas XXXIX y XL se observa mediante el análisis de varianza y la prueba LSD-Fisher que la capacidad de intercambio iónico total no presenta diferencias significativas conforme la resina original y la regenerada.

Los resultados de estas propiedades y su comparación demuestran que la resina de intercambio iónico producida no se ve afectada por su regeneración,

siendo esta efectiva, ya que se mantiene la estructura de la resina así como la cantidad de sitios activos en esta.

La evaluación de la segunda alternativa de reciclaje y la determinación de la viabilidad técnica de preparar una resina de recubrimiento, se analizó inicialmente la compatibilidad con diferentes solventes comerciales, luego se determinaron sus propiedades fisicoquímicas y por último, se estableció su posible funcionalidad de acuerdo a las características observadas. A continuación se discuten los resultados obtenidos.

Los recubrimientos están compuestos de diferentes componentes, de acuerdo a su aplicabilidad y función pueden tener productos específicos que les confieren las propiedades requeridas. Sin embargo, dos componentes son necesarios la resina y el disolvente, es por ello, que se analizó la compatibilidad de diferentes solventes de la industria de los recubrimientos con el poliestireno.

En la Tabla XLI se observan los resultados de las pruebas cualitativas de solubilidad del poliestireno en nueve solventes orgánicos. Se utilizaron dos tipos de poliestireno expandido, el de alta y de baja densidad. Se obtuvieron pruebas positivas para los solventes xileno, tolueno, metil isobutil cetona, acetato de butilo y thinner para los dos tipos de residuos. Estos solventes presentan diferentes propiedades como se muestra en la Tabla LII.

Se requiere que el disolvente utilizado tenga un tiempo de evaporación medio que permita la colocación del recubrimiento y que el costo sea bajo, con ello, observamos que el xileno y el tolueno presentan dichas características. Sin embargo, al comparar el tiempo de evaporación es de mayor conveniencia la utilización del xileno.

Tabla LII. **Propiedades de solventes utilizados**

<b>Solvente orgánico</b>	<b>Tiempo de evaporación</b>	<b>Clasificación según el tiempo de secado</b>	<b>Tipo de solvente</b>	<b>Peso por galón (lb/gal)</b>	<b>Costo (Q/libra)<sup>1</sup></b>
Xileno	770	Medio	Diluyente	7.2	6.72
Tolueno	226	Medio	Diluyente	7.2	6.22
Mek	121	Rápido	Activo	6.68	11.74
Mibk	295	Medio	Activo	6.68	11.38
Alcohol Isopropílico	319	Medio	Cosolvente	6.55	6.97
Acetato de butilo	1410	Lento	Activo	7.3	9.26
Butil cellosolve	6750	Lento	Activo	7.5	9.95
Solvente mineral <sup>2</sup>	-	-	-	6.65	5.99
Thinner Laca <sup>3</sup>	-	-	-	6.9	6.31

<sup>1</sup>: El costo, no incluye IVA y estos precios son para consumos industriales de solvente

<sup>2</sup>: El solvente mineral no tiene las características definidas debido a la combinación de solventes, por lo tanto no se especifican sus características exactas

<sup>3</sup>: El thinner laca no tiene las características definidas debido a la combinación de solventes, por lo tanto no se especifican sus características exactas

Posterior a la selección del solvente a utilizar, se prepararon las resinas de recubrimiento y se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de porcentaje de sólidos totales, densidad, viscosidad, brillo y fineza comparando los dos tipos de poliestireno expandido utilizado.

La primera propiedad que se evaluó es el porcentaje de sólidos totales, esta prueba gravimétrica consiste en tomar una muestra del recubrimiento e introducirla a un proceso de evaporación del solvente hasta obtener los sólidos totales en la muestra, bajo condiciones de temperatura y tiempo establecidos.

En la Figura 35, se presenta el porcentaje de sólidos de los recubrimientos preparados con el poliestireno de baja densidad y el de alta densidad, para preparar ambos recubrimientos se utilizaron 60 gramos de poliestireno expandido y 86.5 gramos de xileno, un 45 por ciento en peso de poliestireno expandido. Sin embargo, al ejecutar las pruebas del análisis, Figura 35, se obtuvo un porcentaje de sólidos de 51 por ciento para el residuo de baja densidad y un 50,79 por ciento para el de alta densidad.

Ambos resultados varían en un 5 por ciento con el valor de referencia teórico. Esto puede ser causado durante la evaporación del xileno, donde parte del solvente pudiera ser atrapado entre los sólidos de la resina. Los coeficientes de variación menores al 1 por ciento indican que las mediciones obtenidas son precisas, con poca variabilidad entre sí.

Se realizó el análisis de varianza y la prueba LSD-Fisher para determinar si existen diferencias significativas entre las medias del porcentaje de sólidos para los dos tipos de poliestireno. Como se observa en la Tabla XLII y XLIII, no existen diferencias significativas entre los sólidos totales que presentan los recubrimientos preparados a partir de los residuos de baja y alta densidad.

La segunda propiedad que se determinó fue la densidad. Esta prueba se realiza con la cubeta de Gardner, la cual es un recipiente con peso y volumen estándar. Una muestra de recubrimiento se vierte hasta que ocupe el volumen total de recipiente, se coloca una tapadera y por rebalse se garantiza el volumen estándar de la cubeta. Se pesa la cubeta y por diferencia de pesos se obtiene la medición de la densidad.

Esta prueba permite evaluar y comparar la resina, poliestireno, utilizada entre en los residuos de baja y de alta densidad. Según la Figura 36, la

densidad del recubrimiento preparado con el poliestireno expandido de baja densidad es de 1,031 g/mL, mientras que la preparada con los residuos de alta densidad es de 1,032 g/mL, únicamente una variación de 0,001 g/mL. Para ambos promedios se obtuvo una desviación estándar menor al 0,001 g/mL.

El análisis estadístico de comparación de medias de la densidad de los dos tipos de recubrimiento preparados, establece que no existen diferencias significativas entre la propiedad de los dos materiales. Con ello, se confirma que la matriz polimérica es la misma, es decir, sin contaminación o grupos reactivos adicionales.

La tercera propiedad medida a los recubrimientos preparados fue la viscosidad, esta propiedad indica la resistencia a fluir de los materiales. Esta es de suma importancia para la industria de los recubrimientos, ya que en conjunto con el solvente utilizado tienen un efecto directo sobre el espesor de la capa de recubrimiento aplicado. Además la viscosidad debe de controlarse ya que una muy alta o baja pueden causar problemas en la manipulación y aplicación de los mismos.

Esta prueba consiste en la utilización de un viscosímetro de rotación, donde la muestra del recubrimiento se vierte en un recipiente con una profundidad específica hasta alcanzar la marca de aforo de la aguja del equipo, la cual rota hasta 200 revoluciones por minuto hasta obtener una lectura estable de la viscosidad del material.

En la Figura 37, se presentan los resultados de la viscosidad de los recubrimientos preparados con los residuos de baja y alta densidad, siendo 140,21 y 140,19 centipoise respectivamente. En ambos casos la desviación estándar de los resultados es menor a 0,1 centipoise, lo que representa valores

del coeficiente de variación menores al 0,1 por ciento. En las tablas XLVI y XLVII, se comparan estadísticamente, las medias de la viscosidad de ambos recubrimientos y se obtuvo que no existen diferencias significativas entre estos.

El brillo fue el cuarto parámetro de medición y comparación de las resinas de recubrimiento preparadas. De acuerdo a su fin, el brillo es una de las características principales de los recubrimientos, este indica la capacidad de reflejar una imagen en una película de recubrimiento. En caso contrario los recubrimientos pueden ser satinados o mates. Esta prueba se realiza mediante un equipo llamado brillómetro que consiste en una fuente luminosa y un detector.

En la Figura 39, se muestra el brillo medido de ambos recubrimientos, siendo el valor medido de 101,1 grados para los residuos de baja densidad y 101,7 los de alta densidad. Con respecto de las tablas XLVIII y XLIX, se observa que no existen diferencias significativas entre los promedios de este parámetro.

Por último, se evaluó la fineza de los recubrimientos, esta propiedad se mide para determinar la finura de molienda y las partículas de mayor tamaño o bien aglomerados en el proceso de dispersión. Sin embargo, para esta investigación se evaluó esta propiedad para observar la presencia de componentes contaminantes de los residuos.

Para los dos recubrimientos se observaron contaminaciones con fineza 6 que indica un tamaño de grano aproximado de 25 micras. Esta contaminación puede deberse a la utilización de cargas extras en la resina o bien contaminación proveniente del solvente utilizado.

Por último conforme las propiedades de porcentaje de sólidos totales, viscosidad y brillo para determinar el posible uso y funcionalidad del recubrimiento preparado. Se utilizó una escala sencilla de dos dígitos donde se califica si la propiedad es adecuada o inadecuada para el recubrimiento evaluado.

Se evaluaron cuatro tipos de recubrimientos, pinturas, barniz brillante, un anticorrosivo y un impermeabilizante. Para los cuatro recubrimientos el porcentaje de sólidos totales y la viscosidad son adecuados para la preparación de estos. El brillo que presenta el recubrimiento lo adecua para su uso en pinturas o en un barniz brillante. Y el último parámetro calificado fue el color, en este caso, la transparencia del recubrimiento permite su utilización como un barniz brillante. Además, se observa que los otros tres recubrimientos requieren de algún aditivo u otro componente para su preparación. Por ello, se establece que la resina de recubrimiento preparada puede funcionar como un barniz brillante para maderas.

Con la definición del posible uso de la resina de recubrimiento y las propiedades fisicoquímicas determinadas se establece que la alternativa de reciclaje de poliestireno expandido para producir una resina de recubrimiento es viable.

Por último, se evaluaron los costos asociados a la elaboración de ambas resinas a escala laboratorio. Se observa que la preparación de la resina de recubrimiento no requiere de equipos o materiales distintos al envase y al solvente de la resina. Con esto, se obtiene un costo de 33,05 quetzales por kilogramo de poliestireno expandido reciclado.

A diferencia de la primera alternativa, la elaboración de la resina de intercambio iónico requiere de un sistema de reflujo el cual permite completar la reacción de sulfonación de la resina del poliestireno expandido, esto representa un costo fijo de 4 865 quetzales. Mientras que el costo de elaboración de resina con respecto de los reactivos requeridos es de 6 379,87 quetzales por kilogramo de poliestireno expandido reciclado.

Al comparar los costos, la alternativa viable es la de preparación de una resina de recubrimiento ya que la diferencia de costos entre ambas alternativas alcanza los 6 345 quetzales.



## 6. ACTIVIDADES DE GESTIÓN, VINCULACIÓN Y DIVULGACIÓN

### Actividades de Divulgación

- Presentación del proyecto en el programa radial *Ciencia y Sociedad* de Radio Universidad.

Se tuvo la participación del grupo de investigación el día miércoles 12 de noviembre del año 2014 en el programa de Radio Universidad Ciencia y Sociedad. En este se presentaron los objetivos, procedimientos y resultados intermedios del proyecto de investigación.

Figura 40. **Anuncio publicitario de participación en programa Ciencia y Sociedad de Radio Universidad**

La Dirección General de Investigación -DIGI-  
De la Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-  
Ciencia y Sociedad en Radio Universidad Presenta:

**"Alternativas de Reciclaje de Poliestireno Expandido DUROPORT"**

**Miércoles 12 de Noviembre 2014  
de 8:30 a 9:30 horas.**

Liámenos e interactúe con nosotros a  
los teléfonos: 22079017 y 18

*Invitados Especiales:*  
Coordinador del Proyecto de Investigación  
*Ing. QCO. Héctor Méndez R.*

Equipo de Investigación  
Karen Gatica  
Gerardo de León  
Edwin Borrayo

Conducido Por: *Inga. Liuba Cabrera de Villagrán*

Escúchanos en 92.1 FM [www.radiusac.tk](http://www.radiusac.tk)

Figura 41. Equipo de investigación en programa de radio



## 7. CONCLUSIONES

1. La alternativa de reciclaje de poliestireno expandido para la preparación de una resina de intercambio iónico es viable, según las propiedades fisicoquímicas evaluadas.
2. Según las características visuales de la resina de intercambio iónico producidas se seleccionó la mezcla de ácido sulfúrico fumante y concentrado para la sulfonación del poliestireno.
3. La resina de intercambio iónico preparada a partir de poliestireno expandido presenta una densidad promedio de  $1,02 \pm 0,02$  g/mL y un  $93 \pm 2,10$  por ciento de retención máxima de agua.
4. La resina de intercambio iónico preparada presenta una capacidad de partición de una sal neutra de  $0,143 \pm 0,001$  miliequivalentes por mililitro de resina húmeda y una capacidad de intercambio iónico total de  $9,89 \pm 0,05$  miliequivalentes por gramo de resina húmeda.
5. La resina de intercambio iónico regenerada presentó una capacidad de partición de una sal neutra  $0,140 \pm 0,002$  miliequivalentes por mililitro de resina húmeda y una capacidad de intercambio iónico total de  $9,90 \pm 0,16$  miliequivalentes por gramo de resina húmeda.
6. La resina de intercambio iónico mantiene sus propiedades de intercambio iónico tras su regeneración, ya que no existen diferencias significativas entre dichos resultados.

7. La alternativa de reciclaje de poliestireno expandido para preparar una resina de recubrimiento es viable según los resultados de las pruebas de caracterización ejecutadas.
8. Se seleccionó el xileno como el mejor solvente del poliestireno expandido para producir la resina de recubrimiento, según la propiedad de tiempo de secado y el costo.
9. El porcentaje de sólidos totales de las resinas de recubrimiento preparadas es independiente del tipo de poliestireno expandido utilizado, siendo de  $1,032 \pm 0,001$  por ciento para los de baja densidad y de  $1,031 \pm 0,001$  para los de alta densidad.
10. La densidad de las resinas de recubrimiento preparadas es independiente del tipo de poliestireno expandido utilizado, siendo de  $51,00 \pm 0,42$  gramos por mililitro para los de baja densidad y de  $50,79 \pm 0,09$  gramos por mililitro para los de alta densidad.
11. La viscosidad de las resinas de recubrimiento preparadas es independiente del tipo de poliestireno expandido utilizado, siendo de  $140,21 \pm 0,05$  centipoise para los de baja densidad y de  $140,19 \pm 0,03$  centipoise para los de alta densidad.
12. El brillo de las resinas de recubrimiento preparadas es independiente del tipo de poliestireno expandido utilizado.
13. La fineza de las resinas de recubrimiento determinan la presencia de componentes contaminantes en las resinas de recubrimiento.

14. Según las propiedades fisicoquímicas de la resina de recubrimiento esta puede utilizarse para producir un barniz brillante para su aplicación en maderas.
  
15. Con respecto de los costos a escala laboratorio, la alternativa de reciclaje viable es la preparación de una resina de recubrimiento.



## 8. RECOMENDACIONES

1. En la alternativa de la resina de intercambio catiónico es necesario realizar un análisis de la consistencia del material en amplios lapsos de tiempo ya que durante las pruebas se observó la degradación de las muestras obtenidas.
2. Realizar un estudio del comportamiento de la resina de intercambio iónico con respecto de diferentes iones metálicos para determinar la eficiencia de intercambio en función al ion objetivo de intercambio.
3. Evaluar las propiedades mecánicas de la resina de recubrimiento.
4. Para continuar con el estudio de las dos propuestas, es necesario complementar las pruebas a una escala industrial en escenarios reales de desempeño.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. ARRIBAS, Carmen. *Investigación de nuevos materiales conductores: polipirrol crecido en polimeros sulfonados*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid ,Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Química-Física ,1991.
2. BAILEY Philip, BAILEY, Christina. *Química orgánica: conceptos y aplicaciones*. Editorial Pearson Educación, 1998. 115 p. ISBN: 97-017-01208
3. BILLMEYER, Fred. *Ciencia de los polímeros*. Barcelona, España: Ediciones Reverte, 1975. 610 p. ISBN: 84-291-70480
4. CALVO CARBONELL, Jordi *Pinturas y recubrimientos: Introducción a su tecnología*. Ediciones Díaz de Santos, 2011. 392 p. ISBN: 84-996-90289.
5. CETMAR. *Informe de sensibilización sobre los efectos en el medio marino de los restos de poliespán*. [en línea]. Juan Pablo Pérez, Life. <<http://www.3fish.org/docs/Informe%20sensibilizaci%C3%B3n%20EPS.pdf>>. [Consulta: noviembre 2014].
6. EPS. *Expanded polystyrene (EPS) and the environment*. [en línea]. EPS Packaging Group. <[http://www.eps.co.uk/pdfs/eps\\_and\\_the\\_environment.pdf](http://www.eps.co.uk/pdfs/eps_and_the_environment.pdf)>. [Consulta: noviembre 2014].

7. FERREIRA, B., HORTAL, M., CORDERO, P., CANDELA, A. *Situación de la gestión de residuos de envases de poliestireno expandido (EPS) en la comunidad valenciana*. [en línea]. Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística. Valencia, España. <<http://www.redisa.uji.es/artSim2008/gestion/A11.pdf>>
8. GONZALEZ RODRIGUEZ Y MARTINEZ JARAMILLO , Diana Marcela y Lorena Marcela. *Síntesis y caracterización de una membrana de intercambio aniónico con aplicación en celdas de combustible alcalinas*. Tesis a nivel licenciatura. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía , 2009.
9. GUIDICE, Carlos, PEREYRA, Andrea. *Tecnología de pinturas y recubrimientos* [en línea]. Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. < [http://www.edutecne.utn.edu.ar/tecn\\_pinturas/tecn\\_pinturas.html](http://www.edutecne.utn.edu.ar/tecn_pinturas/tecn_pinturas.html)>. [Consulta: noviembre 2014].
10. HARLAND, Clive. *Ion exchange: Theory and Practice*. Volumen 6 de RSC Series Paperbacks. Edición ilustrada, Royal Society of Chemistry, 1994. 285 p. ISBN: 08-518-64848
11. HINES Anthony, MADDIX Robert. *Transferencia de masa, fundamentos y aplicaciones*. [trad.] José C. Pecina Hernández. 1era Edición. México : Prentice-Hall, 1987. 568 p. ISBN 0-13-559609-2.
12. LIU, Sean. *Food and agricultural wastewater utilization and treatment*. Estados Unidos: Ediciones John Wiley & Sons, 2008. 296 p. ISBN: 04-702-76428.

13. MIRAVETE, Antonio. *Materiales compuestos, Volumen 1*. Barcelona, España: Ediciones Reverte, 2004. ISBN: 84-921-34984
  
14. UAM, *Intercambio iónico* [en línea]. Universidad Autónoma de Madrid. Área de Ingeniería Química. <[https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambioionico2006.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambioionico2006.pdf)> [Consulta: noviembre 2014].



## 10. ANEXOS

- Datos calculados
  - Evaluación de la viabilidad de reciclar los residuos de poliestireno expandido para producir una resina de intercambio iónico.

### Densidad de retrolavado de resina de intercambio iónico producida

Resina	Repetición	Masa (g)	Volumen de agua añadido (mL)	Volumen final (mL)	Densidad de retrolavado (g/mL)	Densidad promedio (g/mL)	Desviación estándar (g/mL)
1	1	5,03	5,00	9,90	1,03	1,02	0,03
	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	1,03	1,02	0,02
	2	5,45	5,00	10,00	1,00		
	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	0,02
	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	0,03
	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	0,01
	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 (g/mL)						1,02	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (g/mL)						0,01	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)						0,87	

Fuente: elaboración propia

**Retención máxima de agua de las resinas de intercambio iónico  
producidas**

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
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)							2,10
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)							2,24

Fuente: elaboración propia

**Capacidad de partición de una sal neutra de las resinas de intercambio  
iónico producidas**

Resina	Repetición	Masa de resina (g)	Concentración de NaOH (N)	Volumen de NaOH (mL)	Capacidad de salt-splitting por masa de resina húmeda (meq/g)	Capacidad de salt-splitting por masa de resina seca (meq/g)	Capacidad de salt-splitting por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)	Capacidad de salt-splitting (meq/mL)
1	1	5,01	0,10	0,70	0,140	2,146	0,142	0,142
	2	5,01	0,10	0,70	0,140	2,146	0,142	
	3	5,01	0,10	0,50	0,140	2,146	0,142	
	4	5,01	0,10	0,70	0,140	2,146	0,142	
	5	5,01	0,10	0,50	0,100	1,533	0,102	
2	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	0,143
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
3	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	0,143
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
4	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	0,143
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
5	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	0,143
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
PROMEDIO (meq/mL)					0,14	2,13	0,141	0,143
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (meq/mL)					0,01	0,12	0,01	0,00
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)					5,81	5,81	5,80	0,09

Fuente: elaboración propia.

**Capacidad de intercambio iónico total de las resinas de intercambio iónico  
producidas**

Resina	Repetición	Masa de resina (g)	Concentración de HCl (N)	Volumen de HCl (mL)	Capacidad de intercambio iónico por masa de resina húmeda (meq/g)	Capacidad de intercambio iónico por masa de resina seca (meq/g)	Capacidad de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)	Capacidad de intercambio iónico (meq/mL)
1	1	2,00	0,10	1,45	9,710	149,155	9,890	9,890
	2	2,00	0,10	1,45	9,710	149,155	9,890	
	3	2,00	0,10	1,45	9,710	149,155	9,890	
	4	2,00	0,10	1,45	9,710	149,155	9,890	
	5	2,00	0,10	1,50	9,700	149,002	9,880	
2	1	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	9,961	9,961
	2	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	9,961	
	3	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	9,961	
	4	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	9,961	
	5	2,00	0,10	1,10	9,780	150,230	9,961	
3	1	2,00	0,10	1,25	9,750	149,770	9,931	9,937
	2	2,00	0,10	1,20	9,760	149,923	9,941	
	3	2,00	0,10	1,20	9,760	149,923	9,941	
	4	2,00	0,10	1,25	9,750	149,770	9,931	
	5	2,00	0,10	1,20	9,760	149,923	9,941	
4	1	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,869	9,867
	2	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,869	
	3	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,869	
	4	2,00	0,10	1,60	9,680	148,694	9,859	
	5	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,869	
5	1	2,00	0,10	1,65	9,670	148,541	9,849	9,829
	2	2,00	0,10	1,85	9,630	147,926	9,808	
	3	2,00	0,10	1,75	9,650	148,233	9,829	
	4	2,00	0,10	1,85	9,630	147,926	9,808	
	5	2,00	0,10	1,65	9,670	148,541	9,849	
PROMEDIO (meq/mL)					9,72	149,25	9,896	9,897
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (meq/mL)					0,05	0,74	0,049	0,05
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)					0,50	0,50	0,50	0,54

Fuente: elaboración propia.

**Capacidad de partición de una sal neutra de la resina de intercambio  
iónico regenerada**

Resina	Repetición	Masa de resina (g)	Concentración de NaOH (N)	Volumen de NaOH (mL)	Capacidad de salt-splitting por masa de resina húmeda (meq/g)	Capacidad de salt-splitting por masa de resina seca (meq/g)	Capacidad de salt-splitting por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)	Capacidad de salt-splitting (meq/mL)
1	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	0,143
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	3	5,00	0,10	0,40	0,080	1,229	0,081	
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	5	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,122	
2	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	0,139
	2	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,122	
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
3	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	0,139
	2	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,122	
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
4	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	0,139
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	4	5,00	0,10	0,60	0,120	1,843	0,122	
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
5	1	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	0,143
	2	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	3	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	4	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
	5	5,00	0,10	0,70	0,140	2,151	0,143	
PROMEDIO (meq/mL)					0,13	2,06	0,137	0,140
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (meq/mL)					0,01	0,21	0,01	0,002
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)					10,09	10,09	10,09	1,59

Fuente: elaboración propia.

**Capacidad de intercambio iónico total de la resina de intercambio iónico regenerada**

Resina	Repetición	Masa de resina (g)	Concentración de HCl (N)	Volumen de HCl (mL)	Capacidad de intercambio iónico por masa de resina húmeda (meq/g)	Capacidad de intercambio iónico por masa de resina seca (meq/g)	Capacidad de intercambio iónico por mililitro de material sedimentado y retrolavado (meq/mL)	
1	1	2,00	0,10	1,00	9,800	150,538	9,982	9,995
	2	2,00	0,10	0,90	9,820	150,845	10,002	
	3	2,00	0,10	0,90	9,820	150,845	10,002	
	4	2,00	0,10	0,90	9,820	150,845	10,002	
	5	2,00	0,10	8,50	8,300	127,496	8,454	
2	1	2,00	0,10	1,70	9,660	148,387	9,839	9,849
	2	2,00	0,10	1,95	9,610	147,619	9,788	
	3	2,00	0,10	1,50	9,700	149,002	9,880	
	4	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,869	
	5	2,00	0,10	1,55	9,690	148,848	9,869	
3	1	2,00	0,10	0,75	9,850	151,306	10,032	10,028
	2	2,00	0,10	0,75	9,850	151,306	10,032	
	3	2,00	0,10	0,80	9,840	151,152	10,022	
	4	2,00	0,10	0,75	9,850	151,306	10,032	
	5	2,00	0,10	0,80	9,840	151,152	10,022	
4	1	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	9,992	9,994
	2	2,00	0,10	0,90	9,820	150,845	10,002	
	3	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	9,992	
	4	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	9,992	
	5	2,00	0,10	0,95	9,810	150,691	9,992	
5	1	2,00	0,10	2,50	9,500	145,929	9,676	9,656
	2	2,00	0,10	2,75	9,450	145,161	9,625	
	3	2,00	0,10	2,60	9,480	145,622	9,656	
	4	2,00	0,10	2,55	9,490	145,776	9,666	
	5	2,00	0,10	2,60	9,480	145,622	9,656	
PROMEDIO (meq/mL)					9,66	148,45	9,843	9,904
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (meq/mL)					0,32	4,86	0,322	0,16
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)					3,27	3,27	3,27	1,57

Fuente: elaboración propia.

- Evaluación de la viabilidad de reciclar los residuos de poliestireno expandido para producir una resina de recubrimiento

**Densidad de resina de recubrimiento producida de residuos de poliestireno de baja densidad**

Baja densidad	Masa (g)			Densidad (g/mL)			Promedio (g/mL)
	1	2	3	1	2	3	
BD1.1	215,7	215,6	215,9	1,030	1,029	1,032	1,031
BD2.1	215,9	215,9	215,8	1,032	1,032	1,031	1,032
BD3.1	215,9	215,8	216	1,032	1,031	1,034	1,032
AD4.1	215,9	215,8	216	1,032	1,031	1,034	1,032
AD5.1	215,8	215,9	215,8	1,031	1,032	1,031	1,032
AD6.1	215,8	215,9	216	1,031	1,032	1,034	1,032
AD7.1	215,7	215,8	215,9	1,030	1,031	1,032	1,031
AD8.1	215,8	215,9	215,5	1,031	1,032	1,028	1,031
AD9.1	215,7	216	215,9	1,030	1,034	1,032	1,032
AD10.1	215,8	215,9	215,7	1,031	1,032	1,030	1,031
AD11.1	215,9	215,8	215,7	1,032	1,031	1,030	1,032
AD12.1	215,8	215,9	215,9	1,031	1,032	1,032	1,032
PROMEDIO (g/mL)							1,032
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (g/mL)							0,0005
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)							0,047

Fuente: elaboración propia.

**Densidad de resina de recubrimiento producida de residuos de poliestireno de alta densidad**

Alta densidad	Masa (g)			Densidad (g/mL)			Promedio (g/mL)
	1	2	3	1	2	3	
BD1.1	215,5	215,7	215,7	1,030	1,030	1,030	1,030
BD2.1	215,7	215,8	215,8	1,030	1,031	1,031	1,031
BD3.1	215,8	215,9	215,7	1,031	1,032	1,030	1,031
AD4.1	215,7	215,8	215,9	1,030	1,031	1,032	1,031
AD5.1	215,7	215,9	215,9	1,030	1,032	1,032	1,032
AD6.1	215,9	215,9	215,8	1,032	1,032	1,031	1,032
AD7.1	215,8	215,9	215,8	1,031	1,032	1,031	1,031
AD8.1	215,7	215,9	215,9	1,030	1,032	1,032	1,032
AD9.1	215,9	215,9	215,8	1,032	1,032	1,031	1,031
AD10.1	215,8	215,8	215,9	1,031	1,031	1,032	1,032
AD11.1	215,9	215,7	215,9	1,032	1,030	1,032	1,031
AD12.1	215,7	215,7	215,8	1,030	1,030	1,031	1,031
PROMEDIO (g/mL)							1,031
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (g/mL)							0,001
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)							0,063

Fuente: elaboración propia.

**Viscosidad de resina de recubrimiento producida de residuos de poliestireno de baja densidad**

Muestra	Viscosidad (cP)			Promedio (cP)
	1	2	3	
BD1.1	140,3	140,3	140,2	140,267
BD2.1	140,3	140,2	140,4	140,233
BD3.1	140,1	140,2	140,2	140,167
AD4.1	140,4	140,2	140,3	140,300
AD5.1	140,3	140,2	140,1	140,200
AD6.1	140,1	140,2	140,1	140,133
AD7.1	140,2	140,1	140,3	140,200
AD8.1	140,1	140,2	140,3	140,200
AD9.1	140,2	140,2	140,2	140,200
AD10.1	140,3	140,2	140,2	140,217
AD11.1	140,2	140,3	140,1	140,200
AD12.1	140,2	140,2	140,1	140,167
PROMEDIO (cP)				140,207
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (cP)				0,045
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)				0,032

Fuente: elaboración propia.

**Viscosidad de resina de recubrimiento producida de residuos de poliestireno de alta densidad**

Muestra	Viscosidad (cP)			Promedio (cP)
	1	2	3	
BD1.1	140,2	140,1	140,3	140,200
BD2.1	140,3	140,1	140,2	140,217
BD3.1	140,2	140,2	140,3	140,233
AD4.1	140,1	140,2	140,3	140,200
AD5.1	140	140,2	140,1	140,150
AD6.1	140,2	140,2	140,2	140,200
AD7.1	140,2	140,2	140,1	140,167
AD8.1	140,2	140,1	140,3	140,200
AD9.1	140,3	140,1	140,1	140,167
AD10.1	140,3	140,3	140,1	140,217
AD11.1	140,2	140,2	140,2	140,200
AD12.1	140,3	140,2	140,2	140,233
PROMEDIO (cP)				140,199
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (cP)				0,026
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)				0,019

Fuente: elaboración propia.

**Fineza de resina de recubrimiento producida de residuos de poliestireno  
de baja densidad**

Muestra	Fineza (H)			Promedio
	1	2	3	
AD1.1	6	6,5	6,5	6,333
AD2.1	5,5	6	6	5,833
AD3.1	6	5,5	6	5,833
AD4.1	5,5	6	6	5,833
AD5.1	6,5	5,5	6	6,000
AD6.1	6	6,5	6,5	6,333
AD7.1	6,5	6	7	6,500
AD8.1	5,5	6	5,5	5,667
AD9.1	5,5	6	5,5	5,667
AD10.1	6	6	5,5	5,833
AD11.1	6	5,5	6	5,833
AD12.1	6	6	6	6,000
PROMEDIO (H)				5,917
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (H)				0,312
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)				5,270

Fuente: elaboración propia.

**Fineza de resina de recubrimiento producida de residuos de poliestireno  
de alta densidad**

Muestra	Fineza (H)			Promedio
	1	2	3	
AD1.1	6	6	6	6,000
AD2.1	6,5	6	6	6,167
AD3.1	5,5	5,5	6	5,667
AD4.1	6,5	6	6	6,167
AD5.1	6	5,5	6,5	6,000
AD6.1	6	6	5,5	5,833
AD7.1	6	6,5	6	6,167
AD8.1	6	6,5	6,5	6,333
AD9.1	6,5	6	6	6,167
AD10.1	6	5,5	6	5,833
AD11.1	6	5,5	6	5,833
AD12.1	6	5,5	6	5,833
PROMEDIO (H)				6,028
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (H)				0,222
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)				3,675

Fuente: elaboración propia.

**Brillo de resina de recubrimiento producida de residuos de poliestireno de  
baja densidad**

Muestra	Brillo			Promedio (°)
	1	2	3	
AD1.1	99,9	99	98	98,967
AD2.1	102,8	101,8	101,4	102,000
AD3.1	102,7	103,5	99,8	102,000
AD4.1	101,5	103,3	101,4	102,067
AD5.1	103,1	102,1	101,3	102,167
AD6.1	99,6	102,7	99,5	100,600
AD7.1	102,2	102,2	102	101,467
AD8.1	102,1	101,9	98,4	100,800
AD9.1	99,3	100,6	100,8	100,233
AD10.1	103,4	100,8	102,8	101,617
AD11.1	101,6	100	101,1	100,900
AD12.1	100,9	101,2	100,9	101,000
PROMEDIO (°)				101,172
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (°)				0,388
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)				0,384

Fuente: elaboración propia.

**Brillo de resina de recubrimiento producida de residuos de poliestireno de alta densidad**

Muestra	Brillo			Promedio (°)
	1	2	3	
AD1,1	101,9	103,2	100,6	101,900
AD2,2	102,7	101,6	100,5	101,600
AD3,1	102,3	102,3	102,3	102,300
AD4,1	100,7	100,7	99,3	100,233
AD5,1	102	102,3	102,6	102,300
AD6,1	101,6	102,4	102,6	101,483
AD7,1	100,2	100,9	101,2	100,767
AD8,1	100,7	101,5	101,7	101,300
AD9,1	102,2	102,3	101,3	101,933
AD10,1	101,5	101,5	101,5	101,500
AD11,1	103,7	103,8	104,1	102,550
AD12,1	101,1	100,8	101,8	101,233
PROMEDIO (°)				101,761
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (°)				0,696
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)				0,684

Fuente: elaboración propia.

**Porcentaje de sólidos totales de resina de recubrimiento producida de  
residuos de poliestireno de baja densidad**

Muestra	Sólidos totales (%)			Promedio (%)
	1	2	3	
AD1.1	50,9	50,8	50,7	50,800
AD2.1	51,4	51,5	51,6	51,500
AD3.1	50,3	50,4	50,3	50,333
AD4.1	50,8	50,9	50,8	50,833
AD5.1	51,1	51,1	51,2	51,200
AD6.1	51,1	51,3	51,4	51,267
AD7.1	51,1	50	50,2	50,433
AD8.1	50,9	50,9	50,8	51,100
AD9.1	51,3	51,4	51,3	51,333
AD10.1	50,9	50,9	50,8	50,867
AD11.1	51,2	51,3	51,4	51,300
AD12.1	50,9	50,5	50,7	50,700
PROMEDIO (%)				51,000
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)				0,424
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)				0,832

Fuente: elaboración propia.

**Porcentaje de sólidos totales de resina de recubrimiento producida de  
residuos de poliestireno de alta densidad**

Muestra	Sólidos totales (%)			Promedio (%)
	1	2	3	
AD1.1	51,1	50	50,2	50,433
AD2.1	51,2	51,2	51,3	51,233
AD3.1	50,1	50,3	50,4	50,317
AD4.1	50,3	50,4	50,4	50,367
AD5.1	51,4	51,3	51,2	51,300
AD6.1	50,1	50,3	50,4	50,267
AD7.1	51,1	50	50,2	50,433
AD8.1	51,4	51,4	51,4	51,317
AD9.1	51,2	51,2	51,3	51,233
AD10.1	50,3	50,4	50,4	50,367
AD11.1	51,4	51,3	51,2	51,167
AD12.1	51	51	51,1	51,033
PROMEDIO (%)				50,789
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)				0,094
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)				0,186

Fuente: elaboración propia.

## 11. ORDEN DE PAGO

### LISTADO DE TODOS LOS INTEGRANTES DEL EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

Contratados por contraparte y colaboradores	
Ph.D. Casta Petrona Zeceña Zeceña	
Mary Elisa Corado Bautista	
Gerardo Sebastián de León Salazar	
Karen Aracely Gatica Solares	
Edwin Ricardo Borrayo Bautista	

### CONTRATADOS POR LA DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN

Nombre	Categoría	Registro de Personal	Pago	
			SI	NO
Héctor Rolando Méndez Rossal	Titular I	2011- 1201	X	
Oscar Giovanni Córdova Recinos	Titular I	2014-0668	X	
Jacquelin Andrea Corado Bautista	Auxiliar II	2014-0783		X

Nombre	Firma

**Firma Coordinador(a) proyecto de investigación**

**Firma Coordinador(a) Programa Universitario de Investigación.**

**Firma Vo.Bo. Coordinador General de Programas.**