



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**PRINCIPIOS BÁSICOS DE INTERCAMBIÓ IÓNICO EN EL
PROCESO DE REFINACIÓN DE AZÚCAR CRUDO DE CAÑA.**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

NANCY MARTINEZ RUIZ

ASESOR: M.C. MARIA DE JESÚS CRUZ ONOFRE

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U.N.A.M.
 FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
 ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
 PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
 Jefa del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Principios Básicos de Intercambio Iónico en el
Proceso de Refinación de Azúcar Crudo de Caña.

Que presenta la pasante Nancy Martínez Ruiz

Con número de cuenta: 40108004-7 para obtener el título de:
Ingeniera en Alimentos.

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlan Izcalli, Mex. a 26 de Noviembre del 2010

PRESIDENTE Dra. María Elena Vargas Ugalde

Maria Elena Vargas Ugalde

VOCAL MC. Leticia Zúñiga Gómez

Leticia Zúñiga Gómez

SECRETARIO MC. María de Jesús Cruz Onofre

María de Jesús Cruz Onofre

1er SUPLENTE Dra. Abigail Martínez Estrada

Abigail Martínez Estrada

2º SUPLENTE MC. Araceli Ulloa Saavedra

Araceli Ulloa Saavedra



DEDICATORIAS

A mi mamá Rosa Ruiz Sánchez:

Quien con su fuerza, determinación y dedicación me enseñó que solo aquellos que van en contra de los problemas sobresalen y aprenden a vivir.

A mi papa Jesús Martínez Ramírez:

Quien me enseñó dos cosas importantes

1. En este mundo se puede aprender de los errores de los demás.
2. Nunca es tarde para cambiar y retomar las riendas de tu vida.

"En la vida causa gran satisfacción abandonar las cosas pequeñas por el bienestar de la familia, porque las grandes, son de la humanidad"

SANTOS VERGARA BADILLO



A mi hermano Fabián Martínez Ruiz

A quien con su ejemplo, apoyo y sacrificio constante me demostró que vale la pena vivir para dar.

“Señálate metas elevadas, esfuerzate por alcanzarlas, empuñate por lograr rápida y correctamente lo que ambicionas.

Sueña con ello, vive para ello, lucha por ello.

Se constante y fiel a ti mismo, y tan seguro como hay estrellas en el cielo, y llegarás a tiempo a la verdadera meta de la vida.”

Herman Hitz.

A mis hermanas:

- ❖ Virginia Martínez Ruiz
- ❖ Yolanda Martínez Ruiz
- ❖ Araceli Martínez Ruiz
- ❖ Daniela Guadalupe Martínez Ruiz

Con quienes he compartido alegrías, tristezas, enojos, reconciliaciones pero sobre todo mi vida.



A mis hermanos Jesús Cesar y Carolina Martínez Ruiz

Quienes han sido la alegría del hogar quiero decirles que este esfuerzo ha sido inspirado por ellos.

A mis sobrinos:

- ❖ Sayuri Cristal Pérez Martínez
- ❖ Guadalupe Salvador Pérez Martínez
- ❖ Julisa Raquel Zurita Martínez
- ❖ Rodrigo Zurita Martínez
- ❖ Sofía Daniela Villa Martínez
- ❖ María Fernanda Villa Martínez
- ❖ Andrea Valeria Delgado Cuandon

Quienes con su inocencia me recuerdan lo importante que es reír y disfrutar de la vida, los amo.

A mis cuñados:

- ❖ Salvador Pérez Vega
- ❖ Héctor Antonio Pérez Mendoza
- ❖ Juan José Zurita
- ❖ Julio Cesar Villa Flores

Quienes han enriquecido a la familia con su integración demostrando respeto y amor a mis hermanas
al igual que mis sobrinos



A mi esposo, que es el amor de mi vida, Alejandro Delgado Gonzáles quien me ha demostrado que con el respeto, apoyo y comunicación se construye nuestro hogar.

*“El amor conyugal,
Es un estar siempre en un camino,
Es un camino que nunca se acaba
Camino que es aventura,
Siempre nueva,
Siempre capaz de enriquecernos.”*

Anónimo.

A mi abuelita Carmen Ramírez, con todo mi amor.

A toda mi familia que me ha apoyado para salir a delante GRACIAS.

A todos mis amigos Itzel Núñez, Alejandro Baxin, Ana Gabina Cristian, Erika Gestaldi, Devora Belén, Omar Rodríguez, Janeth, Karla Olivia Martínez, Eulalia Rodríguez, Elizabeth Negrete.

Y a quienes me acompañaron durante la carrera.



AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILAN CAMPO 1

Que no solo me brindo una carrera si no una forma de vivir

“TE DARÁS A CONOCER

Ten cuidado de las cosas de la tierra, haz algo:

Corta leña, labra tierra, planta árboles.

Tendrás que comer, que beber, que vestir;

Con eso estarás de pie, serás verdadero.

Con eso andarás en pie, con eso se hablara de ti,

Se te alabara... con eso te darás a conocer.”

Sabiduría popular mixteca.



A la Maestra en ciencias María de Jesús Onofre por su amor al arte.

"Un maestro es un profeta"

El maestro es un profeta, por cuanto pone los conocimientos del mañana.

También es un artista, por cuanto que la arcilla con que trabaja es el material precioso de la personalidad humana.

Es un amigo porque su corazón responde a la fe y a la confianza que en él han depositado sus alumnos.

Es ante todo un ciudadano, ya que su obra estriba en mejorar la sociedad con su enseñanza y su ejemplo.

Es un pionero, porque siempre está intentando lo imposible. Y lo más curioso del caso es que siempre gana.

Es un creyente, todos sus actos se refieren a la fe en el mejoramiento constante de la mente, las facultades y la capacidad de la raza humana."

Joy E. Morgan



INDICE	
JUSTIFICACIÓN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS PARTICULARES.....	4
1.- ANTECEDENTES.....	5
1.1 Historia del Azúcar.....	5
1.1.1 El asentamiento.....	5
1.2 Producción de azúcar en México.....	6
1.3 Definición de azúcar.....	8
1.4 Composición química de la sacarosa.....	8
1.5 Propiedades físicas de la sacarosa.....	10
1.5.1 Solubilidad.....	10
1.5.2 Brix.....	11
1.5.3 El índice refractivo y gravedad específica.....	11
1.5.4 Rotación Óptica.....	12
1.5.5 Viscosidad.....	13
1.5.6 El Calor específico.....	13
1.5.7 El calor de solución.....	14
1.6 Propiedades químicas de la sacarosa.....	14
1.6.1 Reacción de inversión o Hidrólisis.....	14
1.6.2 Descomposición térmica.....	15
1.6.3 Reacción de Maillard.....	15
1.6.4. Degradación acida.....	16
1.6.5. La Degradación alcalina.....	16
1.7 Uso del azúcar en la industria alimentaria.....	16
2. PROCESO DE ELABORACIÓN DEL AZÚCAR.....	18
2.1 Proceso de producción de azúcar estándar.....	19
2.1.1 Labores de campo y cosecha.....	19
2.1.2 Patios de caña.....	19
2.1.3 Picado de caña.....	19
2.1.4 Molienda.....	20
2.1.5 Pesado de jugos.....	20
2.1.6 Clarificación.....	20
2.1.7 Evaporación.....	21
2.1.8 Cristalización.....	22
2.1.9 Centrifugación.....	22
2.1.10 Secado.....	22
2.1.11 Enfriamiento.....	23
2.1.12 Envase.....	23
2.2 Tipos de azúcar.....	23
2.2.1 Clasificación del tipo de azúcar según las Normas Oficiales Mexicanas.....	24
2.3 Refinación de azúcar crudo.....	26
2.3.1 Proceso de refinación.....	30
2.3.2 Decoloración.....	31
2.3.4 Fundamentos.....	32
2.3.5 Características químicas, físicas de los colorantes del azúcar.....	33



2.3.6 Mecanismos de la decoloración.....	35
2.3.7 Tipos de agentes decolorantes.....	36
2.4 Decoloración por intercambio de iones.....	38
3 INTERCAMBIO IONICO.....	40
3.1 Panorama histórico.....	40
3.2 Proceso de Intercambio Iónico.....	42
3.3 Características físicas de los cambiadores de iones.....	45
3.4 Regeneración de las resinas de intercambio iónico.....	48
3.4 Vida útil de las resinas de intercambio iónico.....	49
3.5 Propiedades que se deben de tomar en cuenta para seleccionar una resina de intercambio de iones.....	52
3.5.1 Otras propiedades que se deben de tomar en cuenta para trabajar con resinas de intercambio iónico.....	53
3.6 Problemas más comunes en resinas de intercambio iónico.....	55
3.6.1 Problemas provocados por la operación del equipo.....	55
3.6.2 Problemas que provocan la degradación de la resina.....	56
3.7 Componentes que conforman el equipo de intercambio iónico.....	57
CONCLUSIONES.....	60
ANEXO I.....	62
Determinación del color ICUMSA.....	62
BIBLIOGRAFIA.....	65



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Grafico de la producción de azúcar por zafra.....	7
Figura 2: Molécula de sacarosa.....	9
Figura 3: Procesos de elaboración de azúcar a partir de las diferentes materias Primas.....	18
Figura 4: Diagrama de flujo para la elaboración de azúcar.....	27
Figura 5: Diagrama de bloques para la refinación de azúcar crudo de caña	29
Figura 6: Molécula Iónica/aromática.....	34
Figura 7: Molécula iónica/no aromática.....	35
Figura 8: Red de resina Poliestirenicas.....	36
Figura 9: Resina poliacrítica.....	38
Figura 10: Red de resinas de intercambio iónico.....	50
Figura 11: Ion de resinas de intercambio iónico	50
Figura 12: Columna de intercambio iónico.....	59



INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: compuestos químicos de una molécula de sacarosa en porcentaje.....	9
Cuadro 2: Variedades de azúcar de caña y usos.....	17
Cuadro 3: Azúcar estándar.....	24
Cuadro 4: Refino.....	25
Cuadro 5: Azúcar blanco popular.....	25
Cuadro 6: Propiedades físicas de los materiales para el intercambio iónico.....	51



JUSTIFICACIÓN

México es uno de los diez países con mayor superficie cosechada con caña de azúcar, en los últimos años ha registrado un considerable aumento en la producción de azúcar, por ejemplo para la zafra 2007/2008 concluyó con una producción de cinco millones 521,000 toneladas en los 57 ingenios que operan en los 15 estados cañeros del país (SAGARPA, 2008). Los principales tipos de azúcar producidas en México son el azúcar crudo de caña o estándar, el azúcar refinado y el azúcar blanco, de acuerdo a la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera en el informe actual de producción del 02/05/2009 de la zafra 2008-2009 se han elaborado 2, 888,247 toneladas, 1, 542,292 toneladas, 173,685 toneladas respectivamente; en dichas cifras se puede apreciar que existe un diferencial del casi 50% de la producción de azúcar refinado con respecto al azúcar estándar, y de los cuales la Industria Embotelladora (Refrescos), mantiene una demanda aproximada de 1.8-2.0 millones de toneladas (Lagunes, 2004), es decir, no se cubre la demanda de azúcar refinada que genera la industria alimentaria, por tanto, algunas empresas del sector refresquero han adaptado el método de intercambio iónico como una etapa de proceso más, la cual les permiten procesar azúcar estándar para transformarlo en jarabe simple equivalente a Refinado diluido. En conclusión se sugiere que la agroindustria azucarera debe considerar inversiones en el uso de nuevas tecnologías debidamente seleccionadas para lograr una alta eficiencia en los procesos de refinación de azúcar (Mazaeda; De Prada, 2003), y en específico en el proceso productivo en la etapa de decoloración ya que es una de las operaciones clave en la refinación.

Por tal motivo este trabajo de tesis de carácter documental está dirigido tanto a la agroindustria azucarera, como a ingenieros en alimentos interesados en este ámbito, pretende recopilar información básica de los procesos de refinación de azúcar, destacando la etapa de decoloración utilizando el método de intercambio iónico, como una opción de una nueva tecnología para lograr un aumento en la producción del azúcar refinada.



INTRODUCCIÓN

Los glúcidos, carbohidratos o sacáridos (del griego σάκχαρον que significa "azúcar") son moléculas orgánicas compuestas por Carbono, Hidrogeno y Oxigeno (Badui, 2006). Son solubles en agua (Colutate, 1998) y se clasifican de acuerdo a la cantidad de carbonos o por el grupo funcional que tienen adherido.

El azúcar es un hidrato de carbono de sabor dulce cuyo nombre científico es sacarosa, se extrae de vegetales, como de la molienda de la caña de azúcar (Fahrasmane;Ganou 2005) o de la remolacha azucarera(Desrosier, 1998). Una vez cosechadas la remolacha y la caña son transformadas rápidamente en azúcar estándar o refinada según sea el caso, esto se hace para que no se reduzcan sus cualidades a través de una degradación microbiológica y disminuya la calidad del producto final (Humbert, 1978).

Las industrias consumidoras de azúcar y que están vinculadas con los ingenios se abastecen de éste insumo a precios fijados por el FEESA (Fondo de Empresas Expropiadas del Sector Azucarero) o por los ingenios. Durante las últimas fechas los compradores de azúcar han exigido un producto que cumpla con las normas de calidad más estrictas, como por ejemplo, las Normas Oficiales Mexicanas NMX-F-084-1991 azúcar estándar, NMX-F-003-1991 azúcar refino, NMX-F-516-1990 azúcar blanco popular en las cuales se indican las especificaciones en contenido de colorantes, cenizas, metales, humedad, a demás de un riguroso control microbiológico, etc., para cada producto en particular.

Debido a esto investigadores han desarrollado trabajos en la optimización de las operaciones de refinación, un ejemplo de ello es el trabajo “Decoloración-deodorización industrial de jarabes de azúcar” (Ayala, 2003) en cuyo estudio se realizaron pruebas a nivel laboratorio para optimizar las Condiciones de Operación en clarificación obteniendo como conclusión que la producción de Jarabes con calidad azúcar refinada usando azúcar estándar, está logrando ahorros reales a la industria refresquera. Por tanto, es importante seguir la investigación sobre la etapa de clarificación (Luna, 1995) y desmineralización ya que en la industria de bebidas a base de azúcares, existen restricciones para el uso de jarabes de azúcar con alto color, cenizas y olor. En la actualidad se ha optado por el acondicionamiento del azúcar estándar por medio de procesos de adsorción.



La adsorción es un proceso de separación y concentración de uno o más componentes de un sistema sobre una superficie sólida o líquida (Mc Cabe, 1991). Los distintos sistemas heterogéneos en los que puede tener lugar la adsorción son: sólido-líquido, sólido-gas y líquido-gas (Perry, 1992).

Los adsorbentes más empleados son el gel de sílice, la alúmina, el carbón activo y determinadas resinas sintéticas o resinas de intercambio iónico (Chen, 1999). Estas últimas son particularmente interesantes para la eliminación de compuestos polares, además, son fácilmente regenerables, lo que las hace competitivas frente al carbón activo en muchos casos (Rigola, 1999).



OBJETIVO GENERAL

Estudio de los principios básicos del intercambio iónico en la etapa de clarificación en el proceso de refinación del azúcar crudo de caña como uso de una nueva tecnología para incrementar la producción de azúcar refinada.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Investigar los antecedentes de la industria azucarera en México y la importancia que representa en la industria alimentaria.
2. Analizar el proceso de obtención de azúcar crudo (estándar) para identificar los elementos químicos responsables del color en el azúcar crudo, así como los diferentes métodos de refinación para la eliminación de los mismos.
3. Describir el método de obtención de azúcar refinada por intercambio iónico utilizando jarabes crudos.



1.- ANTECEDENTES

1.1 Historia del Azúcar

El conocimiento del cultivo de la caña de azúcar y su elaboración se extendió desde la India hasta China, por el este, y hasta Egipto, España y Portugal por el oeste, y de aquí hasta el Nuevo Mundo, donde se desarrolló rápidamente en el siglo XVII con la introducción de la esclavitud (FAO, 1990).

La industria del azúcar se ha desarrollado en México desde la década inicial de la Conquista española, siendo una de las actividades de mayor tradición y trascendencia en el desarrollo histórico del país. (Países Latinoamericanos del Caribe exportadores de azúcar, 1985). Esta importancia ha permanecido constante por siglos y la elaboración de azúcar sigue siendo uno de los sectores estratégicos de la economía mexicana, por el carácter básico del bien producido y su esencial papel en la satisfacción de la demanda de calorías de consumo generalizado, así como por su participación en el producto interno bruto, los empleos industriales y agrícolas que genera y sus efectos multiplicadores en la actividad económica. Su distintivo rasgo de agroindustria, que por las necesidades técnicas de la producción debe asentarse en forma integrada en espacios rurales, ha constituido siempre a sus asentamientos en polos regionales de desarrollo, dando peculiares características sociales y económicas a sus zonas de influencia (FUNPROVER, 2003).

1.1.1 El asentamiento

Inicialmente el cultivo estuvo situado en el eje subtropical extendido entre los paralelos 18 y 20. Las dos grandes vertientes –del Golfo y del Pacífico– tuvieron desde el temprano siglo XVI cultivos e ingenios, con un claro predominio durante toda la época



novo hispana de la cuenca del Amilpas –el actual Estado de Morelos-, el sureste de Puebla contiguo a los asentamientos anteriores, el noreste de Michoacán y el centro sur de Jalisco. Poco a poco la caña fue subiendo por la costa, desde Colima a Tuxtla donde se situó el primer ingenio en el continente americano, la expansión se fue haciendo hacia las Huastecas, importante centro desde el siglo XVII hasta hoy, no solamente por la producción de azúcar sino por la de un sinnúmero trapiches piloncilleros que han cumplido un gran papel en el abastecimiento de dulce en México. La modernización tecnológica de la industria azucarera, llevada a cabo a finales del siglo pasado, configuró un nuevo salto en la expansión de los cultivos cañeros, cumplida en lo fundamental entre 1890 y 1940. No sólo crecieron los centros de cultivo ya tradicionales, sino que se abrieron zonas muy importantes que pasarían a ser los nuevos ejes de crecimiento de la industria: la región del bajo Papaloapan, el valle del Fuerte en Sinaloa, la zona de El Mante en Tamaulipas. La etapa armada de la Revolución hizo salir momentáneamente de la producción al espacio que había sido tradicionalmente el mayor productor de azúcar del país, Morelos; pero el efecto más duradero fue la alteración definitiva de la distribución geográfica de la producción de azúcar en México, colocando el largo predominio del Pacífico a la superioridad ya definitiva del Golfo y de Veracruz como primer estado productor de la República Mexicana. Este bascular del peso de la producción azucarera ha sido uno de los cambios fundamentales en el proceso de larga duración de la industria (Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar, 1985).

1.2 Producción de azúcar en México

La producción de caña de azúcar actualmente, se registra en 15 estados de México (Veracruz, Jalisco, San Luis Potosí, Oaxaca, Michoacán, Tabasco, Sinaloa, Chiapas, Nayarit, Puebla, Tamaulipas, Morelos, Quintana Roo, Colima, Campeche), donde se distribuyen 57 ingenios azucareros en el país (PRONAC, 2007). México, en el contexto mundial, ocupa el 6º lugar en producción y consumo de azúcar, el 4º lugar en la



producción de campo de caña de azúcar, por último entre el 4º y 5º lugar en la producción de azúcar por hectárea (SAGARPA, 2007).

A nivel nacional el consumo de azúcar y edulcorantes es de 5.4 millones de toneladas de las cuales 5.2 millones corresponden a azúcar y 200 mil toneladas a alta fructuosa.

En el gráfico nos demuestra el aumento en la producción de azúcar en toneladas de acuerdo a la cosecha de la caña de azúcar o la época para efectuarla (zafra), en México.

Figura 1: Gráfico de la producción de azúcar por zafra



Fuente: FIRA con datos de INFOAZUCAR SIAP SAGARPA



De acuerdo con datos publicados por SAGARPA a través del Infoazucar, la producción de azúcar en México durante la zafra 2007/08 alcanzó los 5.52 millones de toneladas, cifra 3.9% superior al nivel de producción reportado en la zafra inmediata anterior. Asimismo, se cosecharon 48.3 millones de toneladas de caña de azúcar, en otras palabras, en promedio se obtuvieron 11.4 kilogramos de azúcar por tonelada de caña molida, lo que representa un incremento de 5.5% en rendimiento de azúcar por tonelada de caña respecto a la zafra previa.

1.3 Definición de azúcar

El azúcar es un endulzante de origen natural, sólido, cristalizado, constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa (Manual de Técnicas Analíticas de Azúcares para América latina y el caribe, 1984), obtenidos a partir de la caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* L) o de la remolacha azucarera (*Beta Vulgaris* L) mediante procesos industriales (Vollmer, 1999). Se denomina coloquialmente azúcar a la sacarosa. En cambio en ámbitos industriales se usa la palabra azúcar o azúcares para designar los diferentes monosacáridos y disacáridos, que generalmente tienen sabor dulce, aunque por extensión se refiere a todos los hidratos de carbono (Brauerman, 1976).

1.4 Composición química de la sacarosa.

La Sacarosa es un carbohidrato de origen natural compuesto de carbono, hidrogeno y oxígeno (Badui, 2006).

- Fórmula: $C_{12} H_{22} O_{11}$,
- Peso molecular: 342.30 gr.



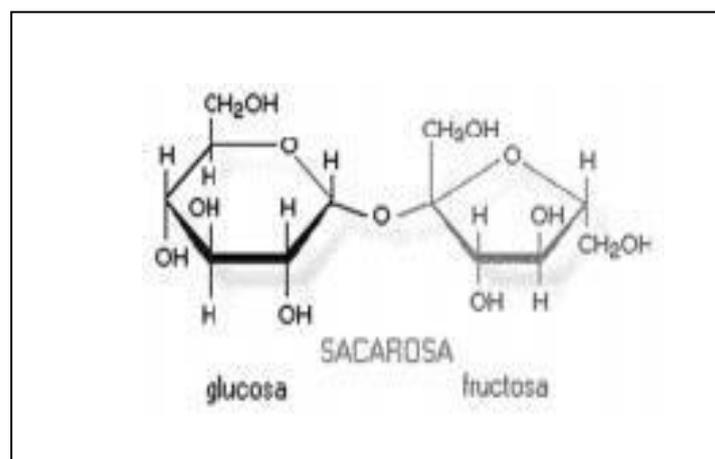
Cuadro 1: Compuestos químicos de una molécula de sacarosa en porcentaje.

Compuesto	Cantidad (%)
Oxígeno	51.42%
Carbono	42.10%
Hidrógeno	6.48%

Fuente: Coultate, 1998

La sacarosa es un disacárido compuesto por una molécula de glucosa (dextrosa) y una de fructosa (levulosa) (Chen, 1999) ver la figura 2.

Figura 2: Molécula de sacarosa



Fuente: Coultate, 1998



Al calentarla en un medio ácido o por acción de la enzima invertasa, se descompone para formar (+) D-glucosa y (-) D-fructosa, mezcla que se llama “azúcar invertido”, y al proceso, “inversión” o “hidrólisis”. Es estable al aire, pero en forma de polvo absorbe la humedad del aire (es decir, se torna higroscópica) hasta en 1%. Es fermentable, pero en altas concentraciones (aproximadamente al 17%) resiste la descomposición bacteriana (Bender, 1995).

1.5 Propiedades físicas de la sacarosa

1.5.1 Solubilidad

La sacarosa es sumamente soluble en el agua y también es soluble en el alcohol y otros disolventes polares. En éter generalmente insoluble, benceno, y otros disolventes no polares. La solubilidad de sacarosa en el agua es una de sus propiedades de mayor estudio ya que es un factor importante en su producción y uso. Existen numerosos cuadros y ecuaciones disponibles para determinar su punto de saturación (la solubilidad máxima) a varias temperaturas y condiciones (Pennigton, 1990).

Una de las ecuaciones propuestas es de D.F. Charles que expresa la solubilidad (s) como el peso del porcentaje en el agua como:

$$S = 64 - 397 + 0.07251t^2 + 0.00205t^2 - 9.0356t^3$$

Donde:

S = Solubilidad del azúcar

t = Temperatura en grados centígrados.



Generalmente, al punto de congelación del agua, aproximadamente 180 gramos de sacarosa son solubles en 100 gramos de agua, y casi 500 gramos están solubles en 100 gramos en agua en el punto de ebullición. Por la comparación, aproximadamente 138 gramos son solubles en 100 gramos de alcohol (etanol).

1.5.2 Grados Brix

La cantidad de sacarosa disuelta en el agua es industrialmente importante, una serie entera para medir este índice fue desarrollada para indicar las proporciones relativas de los dos materiales. El más importante de éstos son los grados Brix que relaciona el porcentaje por el peso de sacarosa en la solución de agua. Por consiguiente, 65 °Brix de una solución representarían el 65 por ciento de sacarosa y 35 por ciento de agua. Así, leyendo normalmente los grados Brix se usarán para obtener la gravedad específica correspondiente o el índice refractivo de una solución que, por la práctica, está correspondiente a una solución de sacarosa pura y a una temperatura de referencia fija, normalmente 20 °C (Pennigton, 1990). Una medida menos usada son los grados Baume.

1.5.3 El índice refractivo y gravedad específica

Como se mencionó anteriormente, la medida de sacarosa en la solución se expresa a menudo como gravedad específica, la proporción del peso de un volumen de solución al volumen similar de agua. Las soluciones de sacarosa también se refractan, es decir, tienen la capacidad para desviar la luz de su trayectoria, y esta refracción se usa como una medida de la densidad de la solución de sacarosa (Pennigton, 1990). La medida de esta refracción se llama el índice refractivo. Esta refracción también varía con la temperatura y la longitud de onda de la fuente de lectura, está normalmente se determina



en 20 °C. Los instrumentos que miden esta propiedad se llaman refractómetros.

1.5.4 Rotación Óptica

Esta es una propiedad importante para los procedimientos analíticos, ya que los grados de rotación de luz serán proporcionales a la cantidad de material ópticamente activo (Pennigton, 1990). Como con la propiedad de refracción, la rotación óptica también depende de la temperatura. Esta propiedad también depende de la longitud celular (la distancia entre las moléculas de la solución). Sosteniendo cada una de estas dos variables de forma constante, es posible medir la cantidad presente de sacarosa en una solución pura. La propiedad de actividad óptica normalmente se define como la rotación específica y se abrevia como el alfa (α). Por ejemplo, si una solución de 100 mililitros, la longitud celular, a una temperatura de 20 °C, y una longitud de onda de luz que corresponde al sodio (589 nanómetros), la rotación específica de sacarosa es:

$$(\alpha)_p20 = +66.53^\circ$$

Donde:

α : Rotación específica

p : Cantidad de la solución en ml.

El signo positivo indica que polarización, es decir, la rotación de la molécula será al derecho. Si una sustancia rota el plano de luz polarizada en sentido de las agujas del reloj se dice que es dextrorrotatoria (+). La sustancia que rota el plano de luz polarizada en sentido antihorario se dice que es levorrotatoria (-). (Litwack 1960)

En 1986, el Comisión internacional para el Métodos análisis Uniforme de Azúcar (ICUMSA) aprobó un método para medir la rotación óptica de una solución pura de sacarosa, su revisión se basó en las nuevas tecnologías, en el equipo y procedimientos a longitud de onda de luz medía la rotación óptica corresponde al mercurio la línea verde, ó 546.227 nanómetros.



1.5.5 Viscosidad

Una medida importante de cualquier fluido es su viscosidad, o su resistencia para fluir. El coeficiente de viscosidad se mide en cm^2/s y este término corresponde a la fuerza requerida por la unidad de área para mantener una velocidad fija de flujo. En las soluciones de sacarosa, la viscosidad aumenta con el volumen de los sólidos, aunque no de forma lineal (Pennigton, 1990). La viscosidad también disminuye rápidamente con un aumento de la temperatura. Y, como una regla general, cuando las impurezas de la sacarosa disminuyen su viscosidad aumentará.

Para las soluciones de sacarosa existen cuadros que relacionan la viscosidad a temperatura y concentración dada, por ejemplo, calentando una solución de sacarosa a 60 °Brix de 20 °C a 50 °C bajará su viscosidad de 6.0 a 1.2 Poise.

1.5.6 Calor específico

Esta propiedad mide la energía requerida, en calorías, para elevar la temperatura un grado Centígrado de un gramo de azúcar. El calor específico para la sacarosa es 0.63 calorías por grado centígrado (Pennigton, 1990). La sacarosa, a menudo es utilizada en solución, y por tanto, el calor específico de la combinación de agua y sacarosa se torna como una propiedad importante. A los 20 °C, el calor específico de la solución pura de sacarosa a 60 °Brix son 0.66 calorías. Una expresión para el calor específico de sacarosa en soluciones de agua es:

$$cp = \frac{1 - (0.632 - 0.001T + 0.001(100 - P)B}{100}$$

Donde:

Cp = Calor específico

T = Temperatura en grados centígrados (°C)



$P = \text{Pureza (sacarosa pura =100)}$

$B = \text{°Brix}$

1.5.7 Calor de solución

Cuando se disuelve la sacarosa cristalina en el agua, la temperatura de la solución disminuye (reacción endotérmica). Esto es porque la sacarosa tiene calor negativo de solución de aproximadamente 2 Kilocalorías por mol (sacarosa: 342.30 gramos/mol).

1.6 Propiedades químicas de la sacarosa

Los azúcares son altamente reactivos, sin embargo, en la sacarosa los sitios reactivos principales son las moléculas de glucosa y moléculas de fructosa, por consiguiente los dos monosacáridos por separado son más reactivos que la sacarosa.

En las soluciones ácidas, la sacarosa se invertirá o se disociará, en sus dos monosacáridos del componente, glucosa y fructosa. Esta reacción se acelerará con el incremento de la acidez y la temperatura. Existen más reacciones de la sacarosa en la solución, incluso el metabolismo humano, empiezan con la reacción de la inversión.

1.6.1 Reacción de inversión o Hidrólisis.

La hidrólisis de un enlace glucosídico se lleva a cabo mediante la disociación de una molécula de agua del medio. El hidrógeno del agua se une al oxígeno del extremo de una de las moléculas de azúcar; el grupo hidroxilo (OH) se une al carbono libre del otro residuo de azúcar (Cheftel, 1988). El resultado de esta reacción, es la liberación de un



monosacárido y el resto de la molécula que puede ser un monosacárido si se trataba de un disacárido o bien del polisacárido restante si se trataba de un polisacárido más complejo (Braerman, 1976).

1.6.2 Descomposición térmica.

La sacarosa seca es estable a su punto fusión. La sacarosa se funde y se degrada en glucosa y fructosa a una temperatura aproximada de 200°C y con ello, se forman una serie de productos durante la descomposición. Una mezcla castaña de agua-soluble oscura llamada caramelo es producido y junto con ello un residuo de carbono. En la presencia de aire u oxígeno, esta descomposición térmica se vuelve en una combustión, para formar en el futuro el anhídrido carbónico y agua. La energía liberada por la combustión de la sacarosa es 3.95 calorías por el gramo (Cheftel, 1988).

1.6.3 Reacción de Maillard.

La Reacción del Maillard es a reacción química que requiere calor, los azúcares simples que forman la sacarosa reaccionan con los ácidos aminados y proteínas. Ésta reacción es muy importante en la preparación de comida ya que produce una familia de productos castaño-coloreados, conocido como el melanoides, junto con los compuestos volátiles de muy buen olor e intensidad de sabor. Estas reacciones son la base para el color y de formación de aroma-sabor que se asocian con las comidas calientes (Fahrasmane, 2005).



1.6.4. Degradación acida.

En general, en presencia de ácidos a un pH por debajo de 3, los monosacáridos llevarán una reacción de inversión y formarán varios productos de reacción de condensación. El resultado, es una serie de oligosacaridos como la isomaltosa y gentiobiose a lo largo de con los derivado del tipo furfuran (Braerman, 1976).

1.6.5. La Degradación alcalina.

La degradación de la sacarosa con bases alcalinas da como resultado productos de doble enlace como los ácidos orgánicos, sin embargo, los productos primarios que participan dan una reacción secundaria la cual origina al compuesto Aldol y la formación de los compuestos cíclicos (Georget, 1990).-

1.7 Uso del azúcar en la industria alimentaria

El azúcar posee distinto uso en la industria, principalmente en la de Alimentos, químico, bioquímico y farmacéutica. Una de las razones de esta diversidad es producto de las distintas propiedades funcionales del azúcar, muchas de ellas se presentan al mezclarse con los componentes de un alimento, afectando sus características físicas, químicas, microbiológicas, textura, conservación (regulando la actividad de agua A_w), además de las características sensoriales de un alimento. A continuación se muestran ejemplos en uso y propiedad en el cuadro 2.



Cuadro 2: Variedades de azúcar de caña y usos.

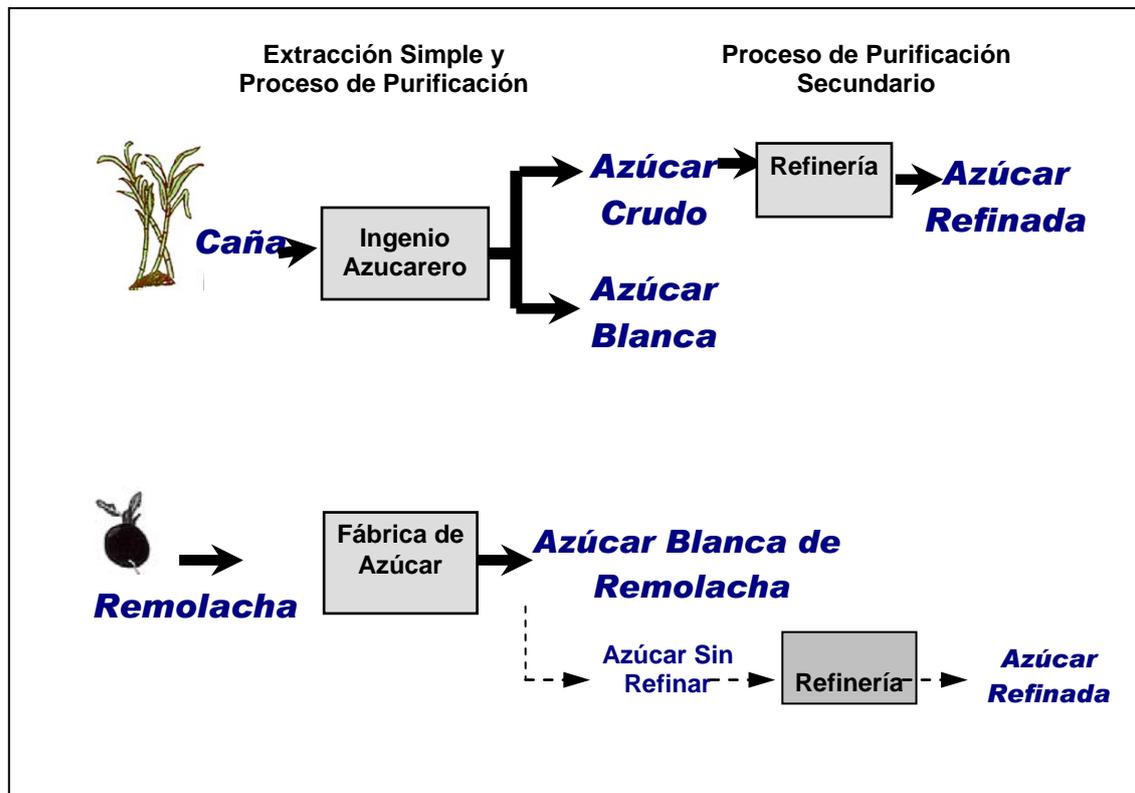
TIPO DE AZÚCAR	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES SUGERIDAS	PROPIEDADES FUNCIONALES
AZÚCAR ESTÁNDAR Ó MORENA	Azúcar natural formada por granos finos, los cuales conservan una ligera película dorada de miel que le da el color característico Su proceso de cristalización le da al azúcar Estándar o Morena su sabor, color atractivo; así como su perfil nutricional	<ul style="list-style-type: none">• Pastelería/Panadería/Galletas• Confitería• Bebidas• Mezcla secas• Productos de belleza	<ul style="list-style-type: none">• Edulcorante• Color uniforme• Fuente de energía
AZÚCAR REFINADA	En general, se llama azúcar refinada a toda azúcar granulada de color blanca con mayor concentración de sacarosa y menor grado de impurezas.	<ul style="list-style-type: none">• Pastelería/Panadería/Galletas• Confitería• Mezclas secas• Bebidas y Farmaceutica	<ul style="list-style-type: none">• Edulcorante• Alto contenido en sacarosa• Bajo contenido de humedad y cenizas• Cristales más finos que el azúcar común



2. PROCESO DE ELABORACIÓN DEL AZÚCAR

Se puede obtener azúcar desde dos materias primas: La Caña de Azúcar y la Remolacha, variando al inicio del proceso, en algunas operaciones, la obtención de azúcar de remolacha con respecto a la de caña. La caña de azúcar contiene entre 8 y 15% de sacarosa. El jugo obtenido de la molienda de la caña se concentra y cristaliza. Los cristales formados son el azúcar crudo o, de ser lavados, el azúcar blanco. En las refinерías el azúcar crudo se disuelve, limpia y cristaliza de nuevo para producir el azúcar refinado. Los diferentes procesos para la purificación del azúcar producen una alta variación en su calidad (Chen, 1999).

Figura 3: Procesos de elaboración de azúcar a partir de las diferentes materias primas



Fuente: Fahrasmane, 2005



2.1 Proceso de producción de azúcar estándar

Para su obtención se requiere de un largo proceso, desde que la semilla de caña germina hasta que el azúcar se comercializa nacional e internacionalmente. A continuación se detalla el proceso en la fábrica (Fahrasmane, 2005).

2.1.1 Labores de campo y cosecha

El proceso productivo se inicia con la preparación del terreno, etapa previa de siembra de la caña. Una vez que la planta madura entre los 12 y 14 meses, las personas encargadas de la tarea de cosecha se disponen a cortarla y recogerla a través del alce mecánico y llevar hacia los patios de caña de los ingenios (Humbert, 1988).

2.1.2 Patios de caña

La caña que llega del campo se muestrea para determinar las características de calidad y el contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas. Luego se pesa en básculas y se conduce a los patios donde se almacena temporalmente o se dispone directamente en las mesas de lavado de caña para dirigirla a una banda conductora que alimenta las picadoras (Publicación del grupo de países latinoamericanos y del caribe exportadores del azúcar. 2 ed. México, 1985).

2.1.3 Picado de caña

Las picadoras son unos ejes colocados sobre los conductores accionados por turbinas, provistos de cuchillas giratorias que cortan los tallos y los convierten en



astillas, dándoles un tamaño uniforme para facilitar así la extracción del jugo en los molinos (Desrosier, 1998).

2.1.4 Molienda

La caña preparada por las picadoras llega a un tándem de molinos, constituido cada uno de ellos por tres o cuatro mazas metálicas y mediante presión extrae el jugo de la caña. Cada molino esta equipado con una turbina de alta presión. En el recorrido de la caña por el molino se agrega agua, generalmente caliente, para extraer al máximo la sacarosa que contiene el material fibroso (Humbert, 1988).

Este proceso de extracción es llamado maceración. El bagazo que sale de la última unidad de molienda se conduce a una bagacera para que seque y luego se va a las calderas como combustible, produciendo el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos (Li, 2002).

2.1.5 Pesado de jugos.

El jugo diluido que se extrae de la molienda se pesa en básculas con celdas de carga para saber la cantidad de jugo que entra en la fábrica (Chen, 1999).

2.1.6 Clarificación

El jugo obtenido en la etapa de molienda es de carácter ácido (pH aproximado: 5,2), éste se trata con lechada de cal, la cual eleva el pH con el objetivo de minimizar



las posibles pérdidas de sacarosa (Chen, 1999). La cal también ayuda a precipitar impurezas orgánicas o inorgánicas que vienen en el jugo y para aumentar o acelerar su poder coagulante (Linden, 1996) se eleva la temperatura del jugo encalado mediante un sistema de tubos calentadores. La clarificación del jugo por sedimentación; los sólidos no azúcares se precipitan en forma de lodo llamado cachaza y el jugo claro queda en la parte superior del tanque. Este jugo sobrante se envía antes de ser desechada al campo para el mejoramiento de los suelos pobres en materia orgánica.

2.1.7 Evaporación

Aquí se comienza a evaporar el agua del jugo. El jugo claro que posee casi la mitad de la composición del jugo crudo extraído (con la excepción de las impurezas eliminadas en la cachaza) se recibe en los evaporadores con un porcentaje de sólidos solubles entre 10 y 12 % y se obtiene una meladura o jarabe con una concentración aproximada de sólidos solubles del 55 al 60 % (Li, 2002).

Este proceso se da en evaporadores de múltiples efectos al vacío, que consisten en una solución de celdas de ebullición dispuestas en serie. El jugo entra primero en el pre-evaporador y se calienta hasta el punto de ebullición. Al comenzar a ebullición se generan vapores los cuales sirven para calentar el jugo en el siguiente efecto, logrando así un menor punto de ebullición en cada evaporador. En el proceso de evaporación se obtiene el jarabe o meladura. La meladura es purificada en un clarificador. La operación es similar a la anterior para clarificar el jugo filtrado (McCabe, 2005).



2.1.8 Cristalización

La cristalización se realiza en los tachos, que son recipientes al vacío de un solo efecto. El material resultante que contiene líquido (miel) y cristales (azúcar) se denomina masa cocida. El trabajo de cristalización se lleva a cabo empleando el sistema de tres cocimientos para lograr la mayor concentración de sacarosa (Li, 2002).

2.1.9 Centrifugación.

La masa pasa por las centrifugas, máquinas agrícolas en las cuales los cristales se separan del licor madre por medio de una masa centrífuga aplicada a tambores rotatorios que contienen mallas interiores. La miel que sale de las centrifugas se bombea a tanques de almacenamiento para luego someterla a evaporaciones superiores y cristalizaciones en los tachos. Al cabo de tres cristalizaciones sucesivas se obtiene miel final que se retira del proceso y se comercializa como materia prima para la elaboración de alcoholes.

2.1.10 Secado

El azúcar húmedo se transporta por elevadores y bandas para alimentar las secadoras que son elevadores rotatorios en los cuales el azúcar se coloca en contacto con el aire caliente que entra en contracorriente a una temperatura de 60°C. El azúcar debe tener baja humedad, aproximadamente 0.05 %, para evitar los terrones (Luna, 1995).



2.1.11 Enfriamiento

El azúcar se a una tempera de 40 °C, se pasa por los enfriadores rotatorios inclinados que llevan el aire frío en contracorriente, en donde se disminuye su temperatura hasta aproximadamente 40-45°C para conducirlo al envase (Mazaeda, 2003).

2.1.12 Envase

El azúcar seca y fría se empaca en sacos de diferentes pesos y presentaciones dependiendo del mercado (Redhead, 1990).

2.2 Tipos de azúcar

El azúcar se puede clasificar por su origen (de caña de azúcar o remolacha), pero también por el grado de refinación de ésta.

Normalmente la refinación se expresa visualmente a través del color azúcar morena, azúcar rubia, blanca.

- **Azúcar Moreno.** El auténtico azúcar moreno (también llamado “negro” o “crudo”) se obtiene del jugo de caña de azúcar sin refinar ni procesar, sólo cristalizado. Este producto integral, debe su color a una película de melaza que envuelve cada cristal. Normalmente tiene entre 96 y 98 grados de sacarosa. Su contenido de mineral es ligeramente superior al azúcar blanco, pero muy inferior al de la melaza. Muchas veces se vende como “azúcar moreno”, azúcar blanco o refinado al que se le ha añadido extracto de melaza, que le otorga un color oscuro y sabor particular.



- **Azúcar Rubio.** Es menos oscuro que el azúcar moreno y con un mayor porcentaje de sacarosa.
- **Azúcar Blanco.** Azúcar con 99,5% de sacarosa. También denominado azúcar sulfatado.
- **Azúcar Refinado o extrablanco.** Azúcar altamente puro, es decir, entre 99,8 y 99,9 % de sacarosa. Se ha cristalizado dos veces con el fin de lograr su máxima pureza.

2.2.1 Clasificación del tipo de azúcar según las Normas Oficiales Mexicanas

Las normas oficiales mexicanas clasifican el azúcar en:

Azúcar estándar NMX-F-084-1991 punto 3.1. Producto sólido derivado de la caña de azúcar o de la remolacha azucarera constituido por cristales sueltos de sacarosa, los cuales no han sido sometidos a un proceso de refinación. (Véase la NMX-F-086 del punto 2). Su obtención se realiza mediante procedimientos industriales apropiados. Las especificaciones fisicoquímicas de acuerdo a la norma se pueden observar en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Azúcar estándar

ESPECIFICACIONES	
SACAROSA APARENTE (POL) A 293 K (20°C), MINIMO	99.3
COLOR, UNIDADES EN % DE REFLECTANCIA, IGUAL O MAYOR A	40.3
CENIZAS SULFATADAS %, MAXIMO	0.25
HUMEDAD %, MAXIMO	0.06

Fuente: NMX-F-084-1991



Azúcar refinada (NMX-F-003-1991 punto 3.1): Sólido derivado de la caña de azúcar o de la remolacha azucarera constituido por cristales sueltos de sacarosa, los cuales han sido sometidos a un proceso de refinación. (Véase la NMX-F-086 del punto 2). Su obtención se realiza mediante procedimientos industriales apropiados. Las especificaciones fisicoquímicas de acuerdo a la norma se pueden observar en el Cuadro 4.

Cuadro 4: Azúcar refinada.

Especificaciones	
SACAROSA APARENTE (POL) A 293 K (20°C), MINIMO	99.90
COLOR, UNIDADES EN % DE REFLECTANCIA, IGUAL O MAYOR A	63.6
CENIZAS SULFATADAS %, MAXIMO	0.04
HUMEDAD %, MAXIMO	0.04

Fuente: NMX-F-003-1991

Azúcar blanco popular (NMX-F-516-1990 punto 3.1). Producto sólido derivado de la caña de azúcar o de la remolacha azucarera, constituido por cristales de sacarosa, cuyas especificaciones se establecen aproximadamente en un punto intermedio entre los correspondientes a los azúcares estándar y refinado. Las especificaciones fisicoquímicas de acuerdo a la norma se pueden observar en el cuadro 5.

Cuadro 5: Azúcar blanco popular

Especificaciones	
SACAROSA APARENTE (POL) A 293 K (20°C), MINIMO	99.70
COLOR, UNIDADES EN % DE REFLECTANCIA, IGUAL O MAYOR A	51.8
CENIZAS SULFATADAS %, MAXIMO	0.15
HUMEDAD %, MAXIMO	0.06

Fuente : NMX-F-516-1990



2.3 REFINACION DE AZUCAR CRUDO

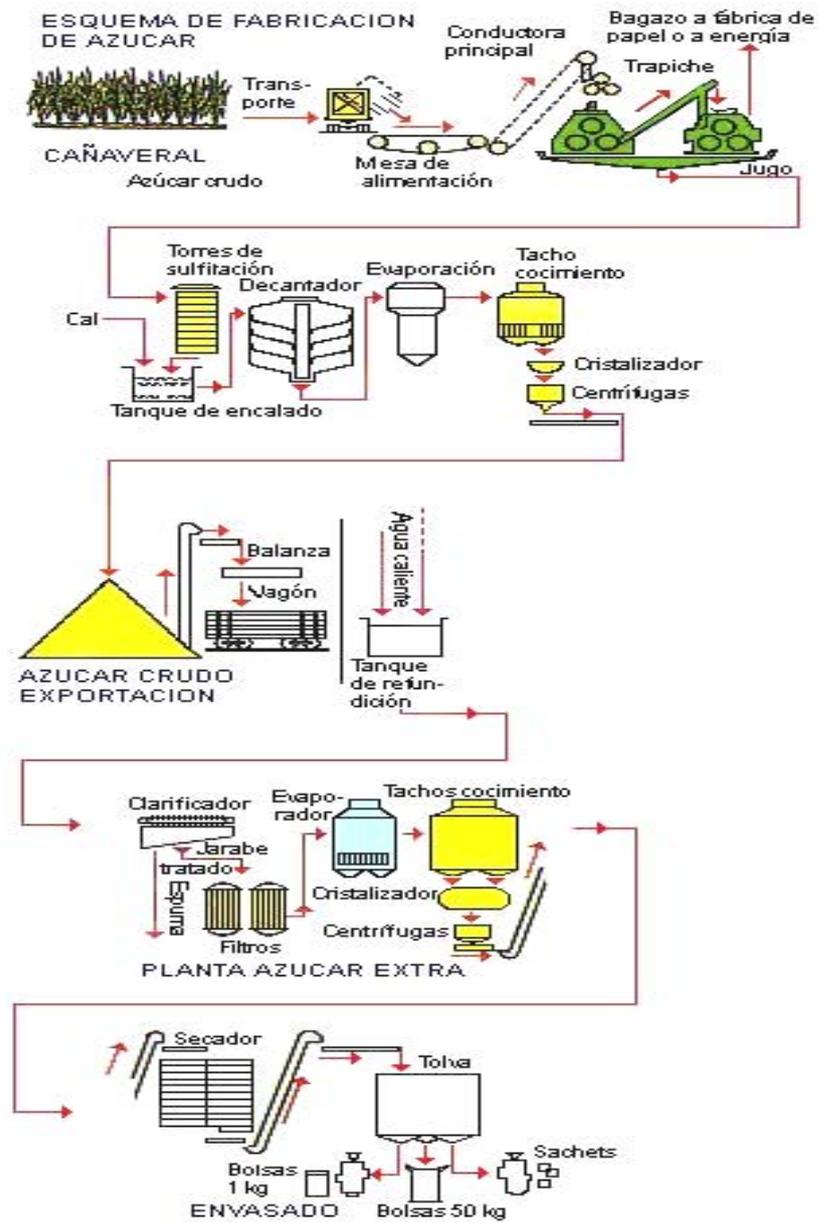
El proceso de refinación de azúcar se da en dos etapas, la primera que se denomina "obtención de azúcar de caña" que ya la hemos descrito en tema 2.1 al 2.1.12 y la segunda que es el "proceso de refinación propiamente dicho" el cual se describe a continuación.

La refinación del azúcar de caña permaneció sin grandes cambios por muchos años, pero en las últimas décadas se ha progresado mucho (Chen, 1999). Los cambios más importantes incluyen el transporte a granel del azúcar crudo desde el ingenio hasta la refinería, la automatización de muchos de los procesos de refinería, tales como la afinación, clarificación y centrifugación. Destacando, el cambio de la clarificación mecánica simple a la química con ácido fosfórico o carbonatación; el aumento del proceso de decoloración mediante la adopción de carbones activados granulados, el uso de resinas decolorantes eliminadoras de cenizas y por la precipitación de colorantes por el uso de compuestos catiónicos de diaquil amonio cuaternario; aumento de volúmenes y clases de jarabes, el manejo y embarque a granel de los azúcares refinados.

Proceso de refinación consiste en obtener el azúcar blanco, casi puro, a partir del azúcar crudo (Georget, 1990). Mediante la refinación, se eliminan o reducen las materias coloidales, colorantes orgánicos e inorgánicos que el azúcar crudo pueda contener (Chen, 1999).



Figura 4: Diagrama de flujo para la elaboración de azúcar



Fuente: <http://www.zucarmex.com/Proceso.htm>



Las refinerías se dividen en tres clases (Chen, 1999):

- 1.- Las refinerías que producen muchas calidades de azúcar incluyendo especialidades
- 2.- Las refinadoras que producen azúcar granulado o unas pocas variantes incluyendo jarabes
- 3.- Las refinerías que solo producen jarabes

Las refinerías que solo producen jarabes se dividen a su vez solo en dos tipos:

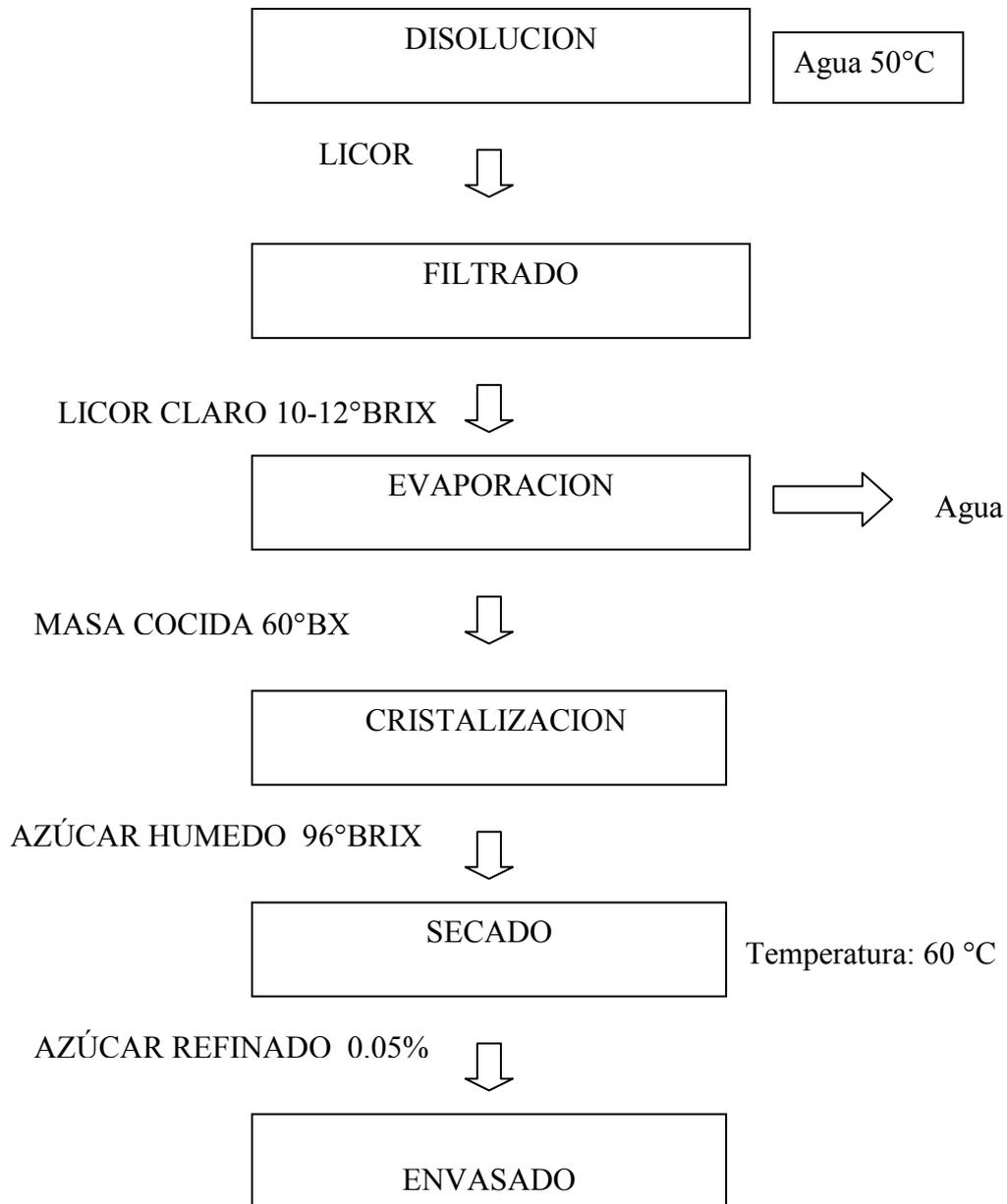
- 3.1 Aquellas que utilizan sistemas de afinación, clarificación, casa de carbón e instalación de recuperación
- 3.2 Aquellas que simplemente funden el crudo entero.

Estas últimas generalmente son de menor tamaño y dependen de la decoloración mediante carbones vegetales activados y resinas decolorantes, y la remoción de cenizas es por resinas. Con objeto de esta investigación nos enfocaremos a este tipo de refinería y a continuación se describe las operaciones a seguir en una planta procesadora de jarabe de azúcar

Ahora, la comercialización del jarabe de sacarosa en los mercados endulzantes, ha encontrando principalmente su mercado en jugueras, refresqueras y empresas de origen lácteo, teniendo un incremento substancial reemplazando gradualmente a la sacarosa granular como una nueva tendencia en dichos mercados (Lagunes, 2004).



Figura 5: Diagrama de bloques para la refinación de azúcar crudo de caña



Fuente: Proceso de refinación del azúcar crudo. (LI, 2002)



2.3.1 Proceso de refinación

El azúcar crudo que llega a la refinería contiene 98% de sacarosa (Li, 2002).

a) Disolución o refinación del Azúcar.- Se mezcla el azúcar crudo con parte de la melaza y el jugo claro obtenido de la limpieza del jugo, hasta llegar a unos 59-60°Brix. Esto facilita las demás operaciones de limpieza y evaporación.

b) Limpieza del licor.- El azúcar disuelto se trata con ácido fosfórico y sacarato de calcio para formar un compuesto floculante que arrastra las impurezas, las cuales fácilmente pueden ser retiradas en el clarificador. El material clarificado pasa a unas cisternas de carbón que remueven por adsorción la mayor parte de los materiales colorantes que están presentes en el licor. Se puede realizar por diferentes métodos, entre estos tenemos:

- Fosfatación.- Donde se emplea ácido Fosfórico y Cal y se puede considerar como un sistema de clarificación muy bueno porque también absorbe color. Este sistema también se refuerza con el empleo de floculantes y con Hipoclorito de Calcio.

- Carbonatación.- Se emplea Cal y Gas Carbónico (CO₂) de Chimeneas, fermentaciones alcohólicas o de piedra caliza. Se considera un buen sistema de clarificación ya que no interviene ningún agente decolorante y retiene impurezas y se produce absorción de color.

- Carbonatación - Sulfitación y Carbonatación - Resinas.- Este sistema es más completo que los anteriores, ya que después de la clarificación con carbonatación, se emplea agentes decolorantes como son el SO₂ y las resinas que producen un intercambio iónico y se vuelve a filtrar.

- Sucro-Blanc.- Se emplea Sugar Fos (Fosfato monocálcico), Sucro Blanc (Cloruro de Calcio - Hipoclorito de Calcio) y Blankit (Hidrosulfito de Sodio) y se pueden apreciar etapas de clarificación y decoloración.

- Carbón Vegetal Activado.- Se emplea ácido Fosfórico, lechas de cal para la clarificación y carbón vegetal activado para la decoloración.



- Carbón Animal Activado.- Empleado mucho antes de usarse el carbón vegetal y aún se sigue usando en algunas refinerías. (Chen, 1999)

c) Formación de cristal.- Se realiza por medio de un proceso similar a la concentración del jugo, se utiliza evaporadores de triple, cuádruple o quíntuple efecto a presión de -0,8 Atm y temperatura de 30°C, siendo el último un cristizador, donde se extraerán los cristales de azúcar refinada.

d) Separación del cristal.- Se realiza por centrifugación, y se separan los cristales de azúcar refinada del jarabe que contiene 80°Brix.

e) Secado del azúcar.- Se realiza en secadores especiales que por acción del flujo de aire caliente se elimina la humedad de los cristales, quedando el azúcar blanca o refinada, con 99,9°Brix. (Tocami, 1987). También el azúcar refinado se puede lavar con vapor condensado, secar con aire caliente, clasificar según el tamaño del cristal y almacenar en silos para su posterior empaque (Mazaeda, 2003).

2.3.2 Decoloración

La decoloración es el proceso clave en la refinación de azúcar. De todas las diferencias entre el azúcar crudo y el azúcar refinado, el color es aquella propiedad que se percibe de inmediato y se puede medir con facilidad. Por consiguiente, el color es especificado a menudo por los usuarios del azúcar y de aquí que constituya una de las principales controles en toda la refinería. Cuando el químico azucarero dice color quiere decir “colorante” el material que origina el color.



Existen tres categorías de colorantes (Li, 2002):

- i. Pigmentos vegetales que provienen de la caña de azúcar
- ii. Materiales del tipo de las melanoidinas que resulta de la acción de los aminoácidos con azúcares reductores.
- iii. Materiales del tipo caramelo resultantes de la descomposición térmica de la sacarosa.

El proceso de decoloración remueve en realidad algo más que el color debido a que los colorantes que interactúan con los precursores del color, los materiales coloidales, los no azúcares orgánicos y los constituyentes inorgánicos que forman ceniza, de manera que todos ellos se eliminan junto con el color.

2.3.4 Fundamentos.

Durante muchos años, la investigación sobre colorantes del azúcar se ha concentrado en la identidad química y origen de los colorantes (Pennington, 1990).

Las moléculas colorantes se encuentran en una extensa gama de pesos moleculares (p.m. de 500 a 50, 000). Hacia el más alto de estos se hallan fragmentos de carbohidratos repolimerizados altamente solubles en agua. Casi todos los colorantes son del azúcar son aniónicos, y los grupos ácidos están situados a lo largo de la molécula del colorante (Moreiras, 2006).

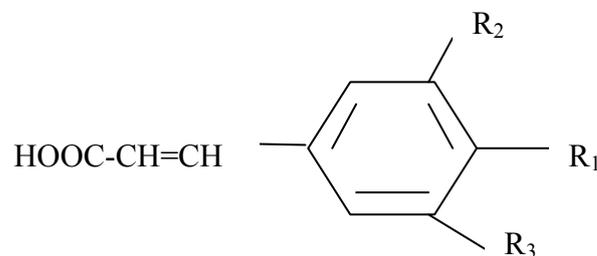


2.3.5 Características químicas y físicas de los colorantes del azúcar

Conocer los tipos de colorantes, es esencial en la práctica con fines de diseño, se pueden clasificar a los colorantes en varias categorías:

Tipo 1: Iónicos/aromáticos: Este tipo de colorantes tiene un grupo iónico funcional y una estructura aromática básica como parte de la estructura molecular. Este tipo puede removerse mediante un absorbente ya sea con función de intercambio de iones o superficie aromática.

Figura 6: Molécula Iónica/aromática



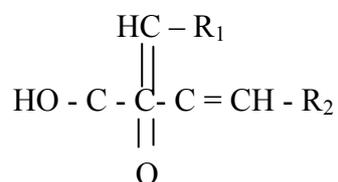
Fuente: (Chen, 1999)



Tipo 2. No iónicos/aromáticos: Ningún grupo iónico está presente. Este tipo de colorante se remueve de la manera más efectiva mediante adsorbentes de naturaleza aromática, como el carbón y en menor grado, mediante resina poliestirenilica.

Tipo 3. Iónicos/No aromáticos: Este grupo contiene grupos iónicos funcionales con una estructura molecular alifática muy probablemente con dobles enlaces conjugados. Debido a su naturaleza alifática, este grupo se elimina de manera muy efectiva mediante un mecanismo de intercambio de iones y en cierto grado, por precipitación.

Figura 7: Molécula iónica/no aromática



Fuente: (Chen, 1999)

Tipo 4. No iónicos/No aromáticos: Este grupo constituye un pequeño número de colorantes que son muy difíciles de remover por los dos adsorbentes de que se disponen usualmente, a menos que la fracción aromática esté altamente conjugada.



2.3.6 Mecanismos de la decoloración

La remoción de los colorantes por lo general resulta de uno o la combinación de los tres mecanismos siguientes:

1. Adsorción mediante enlaces hidrofobitos, por ejemplo, la remoción de un colorante aromático por carbón.
2. Intercambio de iones por medio de un grupo iónico funcional
3. Precipitación seguida por oclusión y/o adsorción de fuerzas van der. Waals.

Estos tipos se resumen como sigue:

- a. Intercambio iónico: colorantes ácidos retenidas por resina en forma aniónica
- b. Adsorción: Enlaces hidrofobitos (interacción aromático-aromático)
- c. Precipitación: se forman complejos con sustancias orgánicas como sales de amonio cuaternario cationes inorgánicos como Ca^{2+} .
- d. Absorción: atrapado dentro del cristal/adsorbente poroso.
- e. Combinación de los anteriores.



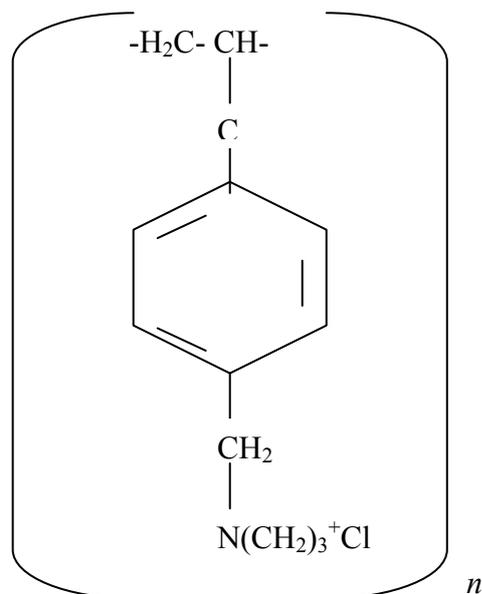
2.3.7 Tipos de agentes decolorantes.

Una vez conocidos tanto la naturaleza de los colorantes como el mecanismo de remoción de color, la siguiente tarea que reclama atención es seleccionar el agente o agentes decolorantes comercialmente obtenibles a fin de maximizar la eficiencia decolorante con el mínimo de capital o costos de operación (Chen, 1999). Los siguientes agentes son los que se utilizan con mayor frecuencia:

I. Resinas de intercambio iónico

Resinas poliestirenicas: A causa de la naturaleza aromática de la estructura del anillo bencénico, este tipo puede remover los colorantes por la vía tanto del mecanismo de adsorción como del intercambio de iones

Figura 8: Resinas poliestirenicas

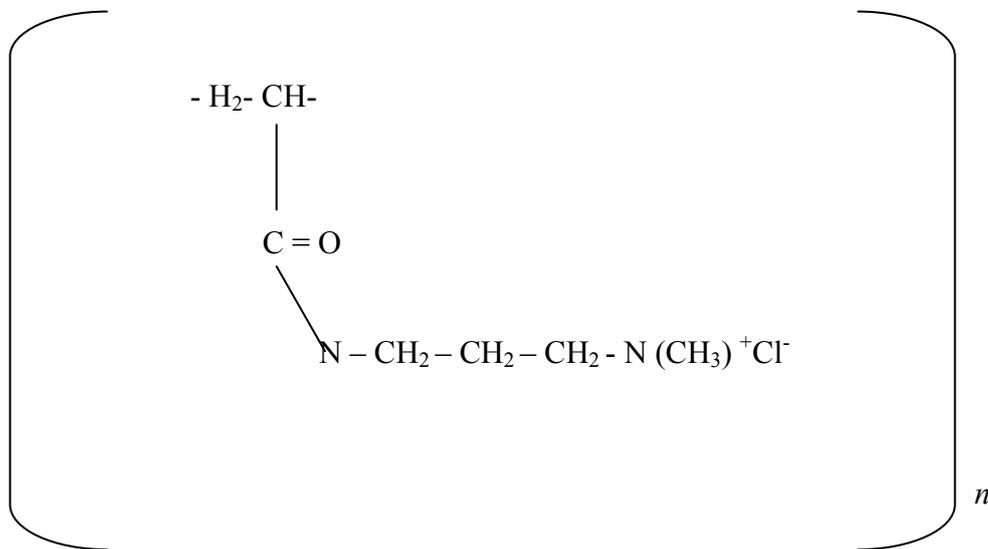


Fuente: Chen, 1999



Resinas poliacrílicas: La adsorción por esta resina de tipo alifático de elevado peso molecular resulta mínima. La remoción del color se efectúa por la vía del proceso de intercambio de iones. Por consiguiente este tipo está menos sujeto al ensuciamiento.

Figura 9: Resina poliacrílica



Fuente: Chen, 1999

II. Carbón activado y pulverizado. Este es un agente de adsorción de colorantes de naturaleza aromática y con dobles enlaces conjugados. Así mismo, se remueven colorantes de elevado peso molecular, particularmente del tipo ácido débil.

III. Carbón Animal (hecho a base de huesos pulverizados de animal):

IV. Carbonatación: Es de esperar que el mecanismo de remoción del color se ajuste a la teoría de la precipitación seguida por absorción (oclusión). Así mismo, es posible la adsorción de colorantes de muy alto peso molecular.



V. Fosfatación con o sin sales de amonio cuaternario. La remoción de color se realiza en su mayor parte por precipitación seguida de absorción/adsorción.

2.4 DECOLORACION POR INTERCAMBIO DE IONES

El intercambio de iones se utiliza cada vez más en el procesamiento de azúcar (Chen, 1998). Una de las razones principales, es que no es necesario utilizar calor en la regeneración, lo que ahorra un combustible costoso.

Entre los principales campos de aplicación se tienen:

1. Decoloración
2. Desmineralización
3. Inversión controlada
4. Exclusión de iones
5. Substitución selectiva de iones

La secuencia típica de operación de unidad aniónica de decoloración es:

- 1) Azucarar (endulzar)
- 2) Servicio (decoloración)
- 3) Desazucarar (desendulzar)
- 4) Lavar a contracorriente (enjuague)
- 5) Regeneración por salmuera
- 6) Desplazamiento de salmuera
- 7) Enjuague final



Si una columna decolorante va a estar sin trabajar, por ejemplo durante un fin de semana, la secuencia anterior se puede interrumpir entre las etapas 5 y 6 lo que permite que la resina quede en la salmuera durante la parada.

Endulzado: Paso en el cual entrara jarabe de azúcar a 61° a 65° Brix a 60°C, para comenzar a desplazar el agua que contienen las unidades, hasta obtener la concentración en °Brix que les sean convenientes a la planta para enviar a servicio

Servicio: Paso en el cual entrará jarabe de azúcar a 67° Brix a 60°C. La calidad del producto desmineralizado es correspondiente a la calidad del producto de entrada, así como la producción, por lo que se deberán establecer bien los parámetros de calidad para el jarabe de alimentación. Para determinar cuando un equipo se encuentra agotado, se deberán de tomar en cuenta los parámetros de calidad de acuerdo a sus estándares.

Desendulzado: Paso en el cual se desplaza el jarabe que contiene la unidad por medio de agua filtrada caliente a una temperatura de 50°C (Luna, 1995).



3 INTERCAMBIO IONICO

3.1 Panorama histórico

Los primeros trabajos sobre el intercambio iónico, se reportaron a mediados del siglo pasado en el área de la agricultura (Spellman, 2000). Los químicos sospechaban que algunas sustancias que estaban presentes en el suelo reaccionaban con las sales disueltas y eran detenidas en reserva hasta que las raíces de las plantas podían adsorberlos. La primera demostración de tal reacción fue hecha por los químicos ingleses; Thomson y Way (Spellman, 2000), reportando que una solución fertilizadora que contenía amoníaco que era pasado través de una columna de laboratorio empacada con tierra de cultivo, el suelo retenía al amoníaco intercambiándolo con calcio, el cual se encontró en los efluentes, ellos pensaban sin embargo, que el intercambio se producía siempre en esa dirección y no en sentido inverso. Un químico alemán, Eichorn, en 1858 fue el primero en probar que las reacciones de intercambio iónico eran reversibles, esto sugirió la posibilidad de “regenerar” la resina, lo cual es la restauración de un material de intercambio exhausto a su estado original por contacto con una sustancia química que lo regenera

El siguiente descubrimiento importante se efectuó en 1905, cuando se descubrió el proceso de suavización del agua con materiales de intercambio iónico llamadas zeolitas.

Eichorn uso tales zeolitas naturales en su investigación de intercambio iónico, el nombre de zeolita fue adoptado por Guns, para designar los materiales de intercambio sintético, y continua en uso actualmente en la suavización del agua y el término más general de intercambiador catiónico es más usado para la desmineralización.



El primer material sintético que se utilizó para el intercambio catiónico fue hecho por la fusión de caolín soda y arena en un horno de vidrio típico pero no duraba mucho.

El material de fusión fue reemplazado por un proceso de precipitación en el cual se produjo un material de intercambio de base de silicosa a partir de soluciones de aluminio sodico y sulfato de aluminio. Posteriormente fueron descubiertos depósitos naturales de arena silicosa o glauconita con propiedades de intercambio iónico. Este tipo de resinas ha sido reemplazadas por resinas orgánicas no silicosas, las cuales tienen una gran capacidad de intercambio.

El proceso utilizando zeolitas de sodio, fue muy exitosa ya que un gran número de ventajas importantes sobre el viejo método de suavización de cal –carbonato para el agua. El proceso de zeolita de sodio tiene ciertas limitaciones, ya que sólo intercambia calcio y magnesio por sodio y deja los aniones sin cambiar. El intercambiador de cationes de hidrogeno, en el cual, el hidrogeno toma el lugar de sodio que convierte todas las sales a sus ácidos correspondientes, así los bicarbonatos de sodio cambio a acido carbónico, este se disocia en CO_2 y agua (Mendiluce, 1975).

Sin embargo el regenerante intercambiador sin embargo, ahora tendrá que ser un ácido y los intercambiadores de cationes en esos tiempos eran desafortunadamente solubles en ácido. Así un nuevo intercambiador tuvo que ser encontrado: uno que se adaptara al proceso de intercambio para cationes de hidrogeno. El primer intercambiador exitoso fue producido por sulfonatacion selectiva con acido sulfúrico fumante. La zeolita podía mantenerse en aguas de pH bajo y por lo tanto podían ser regeneradas con acido. Este fue el primer material no silicoso de intercambio iónico orgánico y se que conoce comúnmente como “zeolita carbonosa”.

Un equipo de químicos ingleses, Adams y Holmes (streater, 1978), fueron los pioneros en este trabajo cuando publicaron en 1935. Ellos notaron nuevos intercambiadores y predijeron que la completa desmineralización estaba en camino, sin embargo los primeros intercambiadores de aniones eran muy pobres de calidad y solamente débilmente básicos así que no podían remover el silicio.



El descubrimiento de resinas de intercambio catiónico y aniónico de gran capacidad usadas todavía en desmineralización fue estimulada por el trabajo de D' Alelio (Spellman, 2000). La mayoría de las resinas modernas consisten en una matriz o centro polimérico las cuales son atacadas en los grupos ionizantes obteniéndose en este nuevo proceso el nuevo material que, a su vez, está formado por varios materiales orgánicos, tales como el estireno o un ácido acrílico el cual es copolimerizado con divinilbenceno, este último presente en el copolímero en menor proporción, el tipo de grupos ionizables que ataca el centro de la resina, determina si la resina es débil o fuertemente ácido, produce aminación para la mayoría de intercambiadores de aniones.

3.2 Proceso de Intercambio Iónico

Los procesos de intercambio de iones son básicamente reacciones químicas entre iones en solución y iones de una fase sólida insoluble. Las técnicas que se usan en el intercambio de iones se parecen tanto a las que se utilizan en la adsorción, que para la mayoría de los fines de la ingeniería, el intercambio de iones se puede considerar como un caso especial de la adsorción. (Geankoplis, 2005).

Por lo general el intercambio iónico es un efecto tridimensional el sólido polimérico, y este es de tipo “gel” porque adsorbe (o disuelve) parte del solvente en la fase fluida. En el intercambio iónico, especies de tipo molecular con cargas positivas (cationes) o negativas (aniones) que existen el fluido, por lo general en la solución acuosa, reemplazan iones no semejantes con el mismo tipo de carga que inicialmente se encontraban en el sólido, es decir, comprende el intercambio entre los iones presentes en una disolución (contaminantes) y los iones de un sólido (resina).

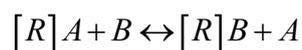
La mayor parte de los sólidos de intercambio de iones en la actualidad son resinas o polímeros sintéticos, ya sea preformada y posteriormente sometidas a una reacción química, como el poliestireno, o formadas a partir de monómeros activados.



Ciertas resinas poliméricas sintéticas contienen grupos sulfónicos, carboxílicos o fenólicos y estos pueden cambiar cationes. Algunas resinas tienen una matriz acrílica en lugar de estirenica, u otros grupos polimerizantes (epoxi, etc.) (Rigola 1999).

Las difusividades de los iones en la fase de la resina son numéricamente similares a la de los solventes de viscosidad moderada y disminuyen con rapidez, al incrementarse la valencia o el diámetro.

El intercambio iónico se expresa como una reacción reversible que comprende cantidades químicamente equivalentes (Perry, 1992). Si asignamos la resina por [R] podemos escribir:



Donde:

R: Resina

A: Acido

B: Base

Y aplicando la ley de acción de masas se obtiene un coeficiente de selectividad (equivalente a la constante de equilibrio):

$$K_{eq} = \frac{A(B[R])}{B(A[R])}$$

Donde:

Keq: Constante de equilibrio

R: Resina

A: Acido

B: Base



Que no es exactamente una constante sino que depende de las condiciones experimentales. Aunque la resina tome con preferencia unos iones A frente a unos iones B, al tratarse de una reacción reversible podemos invertir esta tendencia aumentando la concentración de B muy por encima de la A. Este es el fundamento de la regeneración de resinas (Georget, 1990).

Un ejemplo común del intercambio catiónico es la reacción para el ablandamiento del agua:



Donde R representa un lugar estacionario aniónico univalente en la malla del polielectrolito de la fase intercambiador.

El intercambio iónico no está restringido al tratamiento de agua (Romero, 2005), sino que tiene un amplio campo de aplicación, tal como:

- Decoloración y reducción de cenizas en soluciones de azúcar
- Recuperación y purificación de estreptomicina.
- Remoción del ácido fórmico del formaldehído
- Recuperación de metales de soluciones
- Desalinización de aguas salobres
- Eliminación de acidez de efluentes minero-metalúrgicos
- Recuperación de uranio



3.3 Características físicas de los cambiadores de iones

Los cambiadores de iones son productos insolubles, que se presentan en forma de granos de 0.3 a 1.5 mm y poseen las propiedades de permutar alguno de sus iones con la de las sales disueltas en la solución con las que se ponen en contacto.

Las materias dotadas de esta cualidad que primeramente se utilizaron fueron tierras naturales, después silico-aluminatos sintéticos y por último sustancias orgánicas obtenidas por tratamientos de productos naturales o bien sintéticamente.

Los cambiadores de iones pueden tener diversos orígenes y se mencionaran solo los principales.

1.- Los silico-aluminatos sintéticos: Utilizados únicamente para el ablandamiento en frío de aguas. Estos se utilizan cada vez menos en la actualidad.

2.- Los carbones sulfatados: Preparados a partir de carbones grasos, residuos de la destilación del petróleo y en general de materias orgánicas leñosas, sulfonadas en caliente.

3.- Las resinas sintéticas: Existe un gran número de resinas sintéticas, que pueden utilizarse en el intercambio de iones y a continuación se mencionan:

a) Grupo de resinas fenol-formaldehído sulfonados: Cuyas características en general, son las mismas que las de los carbones sulfanados, pero con un poder de cambio superior. Estos productos como consecuencia de su elevado costo, han sido substituidos por los poliestirenos sulfanados.

b) Grupo de resinas poliestirenicas: cambiadores de elevado poder de cambio y de fuerte acidez, que pueden utilizarse con aguas calientes (hasta 140°C) y de gran alcalinidad.



c) Grupo de resinas carboxílicas de características especiales, con ellas se consiguen descarbonizar agua pero ácidos fuertes, su gran avidéz por los iones H^+ permite obtener en el ciclo ácido un rendimiento de la regeneración muy próximo al 100%.

d) Grupo de cambiadores de aniones, que comprenden 2 grandes grupos:

- Cambiadores débiles o medianamente básicos, que son generalmente aminas terciarias y que permiten cambiar pudiendo ser regeneradas con sosa cáustica (Hidroxido de Sodio)
- Cambiadores fuertemente básicos que son normalmente de dos tipos según sean sus grupos activos:

Las resinas aniónicas fuertes tipo I, amonios cuaternarios, tienen características mas básicas que las del tipo II, generalmente con un grupo dimetiletanolamina. Permiten fijar todos los ácidos, incluso los mas débiles (ácido carbónico y sílice), pero que no pueden regenerarse mas que con gran cantidad de Hidróxido de sodio.

En general los cambiadores de iones fabricados sintéticamente, son usados ampliamente a medida que ha progresado su técnica, para usarse en: tratamiento de aguas, industria farmacéutica, industria azucarera, para tratamiento de desechos industriales y como catalizadores en reacciones químicas.

La síntesis de las resinas de intercambio iónico envuelve la unión de polímeros lineales mediante enlaces cruzados para formar el sitio de intercambio.

Las unidades de los polímeros lineales utilizados son generalmente, estireno, acrilatos y la unión mediante enlaces cruzados es por divilbenceno.



Se considera una resina tipo gel como una estructura de polímeros homogéneos de enlaces cruzados con grupos de intercambio iónico distribuidos estadísticamente a través de toda la partícula. Es muy difícil describir la porosidad o la estructura del poro de dichos geles ya que la distancia, las cadenas y los enlaces cruzados varía considerablemente, dependiendo de los factores tales como la concentración del electrolito del solvente y los iones móviles e inmóviles y de la temperatura.

Para el año de 1959 se inició una nueva técnica de polimerización que posibilita formar varios enlaces cruzados en la estructura del intercambiador, completamente distinto a los de tipo gel convencionales teniendo una estructura macroporosa rígida, similar aquellos de los cambiadores convencionales. A este tipo nuevo tipo de resinas se les ha denominado resinas de intercambio iónico macrorreticulares.

Su estructura macrorreticular está basada en copolímeros como el estireno, divinilbenceno o copolímeros acrílicos y son químicamente muy similares en estructura a las resinas tipo gel convencionales, también basadas en copolímeros similares.

La estructura porosa permite la remoción de sustancias de alto peso molecular tales como materia orgánica y especies coloidales que normalmente pasan a través de sistemas de resinas convencionales.

En cuanto a la capacidad de intercambio como resistencia química, física y al envenenamiento orgánico; son más resistentes, lo que ha significado una nueva aplicación de estas resinas en el intercambio iónico.

Hay una gran variedad de razones, por la que se fabrican resinas macrorreticulares. Debe reconocerse que hay ventajas y desventajas inherentes en ambos tipos de resinas, algunas razones de fabricación son:

Estas resinas son más estables física y químicamente, que sus contra-partes tipo gel. Bajo condiciones severas de esfuerzos.



Su estructura física única hace su uso único en fases gaseosas y otras fases gaseosas y otras fases no acuosas. En cuanto a costo, estas resinas son más caras que las de tipo gel.

3.4 Regeneración de las resinas de intercambio iónico

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 haciendo pasar soluciones que contengan el ión móvil original, el cual se deposita en la resina y desaloja los iones captados durante el agotamiento.

Para la regeneración de las resinas de intercambio iónico se usa:

- A. Sal común (cloruro de sodio) para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes.
- B. Ácido clorhídrico o ácido sulfúrico (depende del costo y de la eficiencia): para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes y resinas catiónicas de ácidos débiles.
- C. Hidróxido de sodio o hidróxido de amonio: para regenerar resinas aniónicas de bases fuertes y resinas aniónicas de bases débiles.

Una vez regenerada la resina está lista para un nuevo ciclo de intercambio iónico.



3.4 Vida útil de las resinas de intercambio iónico

Después de una serie de ciclos de intercambio iónico las resinas de intercambio iónico sufren la pérdida de sitios de intercambio activo o sufren la rotura de los enlaces transversales de la resina, disminuyendo su capacidad de intercambio.

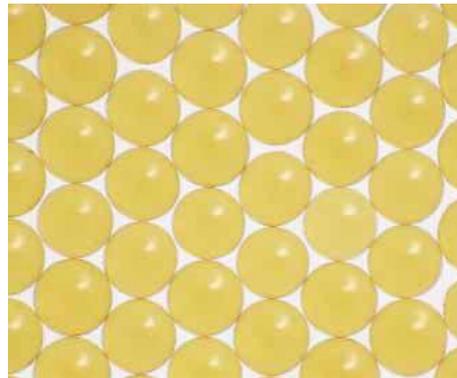
Las resinas catiónicas fuertes primero pierden su capacidad de intercambio para captar cationes asociados a los ácidos fuertes y las resinas aniónicas fuertes disminuyen su capacidad de captar aniones débiles a baja concentración, tales como los carbonatos y silicatos.

La mayoría de autores de la especialidad asignan una vida útil esperada de las resinas de intercambio iónico entre los 5 y los 10 años. Según la Empresa RHOM AND HASS (fabricante de resinas de intercambio iónico) las resinas aniónicas tienen una vida útil teórica de 70 a 300 m³ de agua tratada por litro de resina y las resinas catiónicas de 200 a 1500 m³ de agua tratada por litro de resinas; en ambos casos dependerá de la calidad del agua a tratar.

Existen métodos de laboratorio que permiten determinar la capacidad de intercambio iónico de una resina dada, la mayoría de los cuales han sido desarrollados por las empresas fabricantes. La utilidad de poder determinar la capacidad de intercambio iónico reside en poder comparar las capacidades de varias resinas cuando se necesita escoger una resina adecuada a las necesidades de operación; así mismo sirve para saber el estado de la vida útil de una resina que está en uso y determinar en que momento necesita ser cambiada.

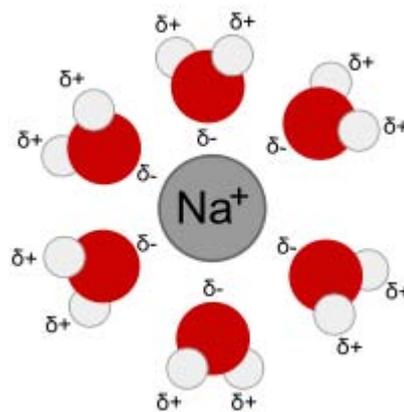


Figura 10: Red de resinas de intercambio iónico



Fuente: Hara, 1975

Figura 10: Ion de resinas de intercambio iónico



Fuente: Hara, 1975



TABLA 4: Propiedades físicas de los materiales para el intercambio iónico

Material	Forma* de las partículas	Densidad masiva en húmedo (drenada), kg/L	Contenido de humedad (drenado), % en peso	Hinchamiento debido al intercambio, %	Temperatura máxima de operación, °C	Intervalo de pH de operación	Capacidad de intercambio	
							Seco, equivalente/kg	Húmedo, equivalente/L
Intercambiadores catiónicos fuertemente ácidos								
Sulfonato de poliestireno								
Resina homogénea (gel)								
4% de enlaces cruzados (EC)	S	0.75-0.85	64-70	10-12	120-150	0-14	5.0-5.5	1.2-1.6
6% de enlaces cruzados		0.76-0.86	58-65	8-10			4.8-5.4	1.3-1.8
8 a 10% de enlaces cruzados		0.77-0.87	48-60	6-8			4.6-5.2	1.4-1.9
12% de enlaces cruzados		0.78-0.88	44-48	5			4.4-4.9	1.5-2.0
16% de enlaces cruzados		0.79-0.89	42-46	4			4.2-4.6	1.7-2.1
20% de enlaces cruzados		0.80-0.90	40-45	3			3.9-4.2	1.8-2.0
Estructura macroporosa,								
10-12% de enlaces cruzados	S	0.81	50-55	4-6	120-150	0-14	4.5-5.0	1.5-1.9
Resinas fenólicas sulfonadas	G	0.74-0.85	50-60	7	50-90	0-14	2.0-2.5	0.7-0.9
Carbón sulfonado	G							
Intercambiadores catiónicos, débilmente ácidos								
Acrílico (pK5) o metacrílicos (pK6)								
Resina homogénea (gel)								
Macroporosa	S	0.70-0.75	45-50	20-80	120	4-14	8.3-10	3.3-4.0
Resina fenólica	S	0.67-0.74	50-55	10-100	120	.....	-8.0	2.5-3.5
Fosfonato de poliestireno	G	0.70-0.80	-50	10-25	45-65	0-14	2.5	1.0-1.4
Aminodiacetato de poliestireno	G, S	0.74	50-70	<40	120	3-14	6.6	3.0
Amidoxima de poliestireno	S	0.75	68-75	<100	75	3-14	2.9	0.7
Tiol de poliestireno	S	-0.75	58	10	50	1-11	2.8	0.8-0.9
Celulosa	S	-0.75	45-50	.....	60	1-13	-5	2.0
Fosfonato								
Carboxilato de metileno	F	.....	.....	.....	.....	.....	-7.0	
Atena verde (silicato de Fe)	F, P, G	.....	.....	.....	.....	.....	-0.7	
Zeolita (silicato de Al)	G	1.3	1-5	0	60	6-8	0.14	0.18
Tungstato de circonio	G	0.85-0.95	40-45	0	60	6-8	1.4	0.75
	G	1.15-1.25	-5	0	>150	2-10	1.2	1.0
Intercambiadores aniónicos, fuertemente básicos								
A base de poliestireno								
Trimetil bencil amonio (tipo I)								
Homogéneo, 8% de EC	S	0.70	46-50	-20	60-80	0-14	3.4-3.8	1.3-1.5
Macroporoso, 11% de EC	S	0.67	57-60	15-20	60-80	0-14	3.4	1.0
Dimetil hidroxietil amonio (tipo II)								
Homogéneo, 8% de EC	S	0.71	-42	15-20	40-80	0-14	3.8-4.0	1.2
Macroporoso, 10% de EC	S	0.67	-55	12-15	40-80	0-14	3.8	1.1
A base de acrílicos								
Homogéneo (gel)	S	0.72	-70	-15	40-80	0-14	-5.0	1.0-1.2
Macroporoso	S	0.67	-60	-12	40-80	0-14	3.0-3.3	0.8-0.9
A base de celulosa								
Etil trimetil amonio	F	.....	.....	.....	100	4-10	0.62	
Trietil hidroxipropil amonio	F	.....	.....	.....	100	4-10	0.57	
Intercambiadores aniónicos, medianamente básicos (pK 11)								
A base de poliestireno								
Epoxi poliamida	S	0.75	-50	15-25	65	0-10	4.8	1.8
	S	0.72	-64	8-10	75	0-7	6.5	1.7
Intercambiadores aniónicos, débilmente básicos (pK 9)								
Aminopoliestireno								
Homogéneo (gel)	S	0.67	-45	8-12	100	0-7	5.5	1.8
Macroporoso	S	0.61	55-60	-25	100	0-9	4.9	1.2
Amina a base de acrílico								
Homogéneo (gel)	S	0.72	-63	8-10	80	0-7	6.5	1.7
Macroporoso	S	0.72	-68	12-15	60	0-9	5.0	1.1
A base de celulosa								
Aminoetil	P	.....	.....	.....	.....	.....	1.0	
Dietil aminoetil	P	.....	.....	.....	.....	.....	-0.9	

* Formas: C, partículas cónicas; G, granulos; P, polvo; S, esteras.

† Cuando se muestran dos temperaturas, la primera se aplica a la forma H del intercambiador de cationes o a la forma OH del intercambiador de aniones; la segunda, al ion de la sal.

NOTA: Para convertir kilogramos por litro en libras por pie cúbico, multiplíquese por 6.238 x 10³; °F = 9/5 °C + 32.



Fuente: Perry, 1992.

3.5 Propiedades que se deben de tomar en cuenta para seleccionar una resina intercambiadora de iones.

Funcionalidad. La selección de la resina apropiada, depende primordialmente de la naturaleza del sistema. La mayoría de las resinas intercambiadores catiónicos tipo acidosulfunico y las de intercambio aniónico tipo cuartenario de amonio pueden ser usadas para adsorber o separar prácticamente todas las especies iónicas. Sin embargo cuando se involucra eficiencia o en la estabilización de materiales de naturaleza biológica.

Porosidad y grado de entrecruzamiento: las resinas intercambiadoras las cuales son hechas generalmente a altos niveles de entrecruzamiento, generalmente materiales algo porosos, estas son usualmente empleadas para especies iónicas de bajo peso molecular

Y las resinas intercambiadoras iónicas con menor porosidad están reservadas para trabajo que involucra especies iónicas de alto peso molecular, el grado de entrecruzamiento afecta la selectividad de varios cationes y aniones.

Tamaño de partículas. El tamaño normal (malla 16-50) debe de ser empleado usualmente para la separación de aniones de los cationes o especies iónicas de las no iónicas. Partículas mas pequeñas son necesarias para separaciones más difíciles (Kremers, 1983).



3.5.1 Otras propiedades que se deben de tomar en cuenta para trabajar con resinas de intercambio iónico.

Pretratamiento. La forma iónica de cada material de intercambio que no afecta tanto a su masa equivalente como el contenido de agua en el equilibrio. Y será de influencia en los valores numéricos obtenidos en las determinaciones de capacidad de intercambio, en medidas de densidad y en el tamaño de las partículas (Hein, 1981).

Capacidad de retención de agua. La capacidad de retención de agua de un material de intercambio iónico es proporcional al volumen del poro. Para materiales nuevos de la misma funcionalidad y clase de polímeros, altos valores, indican una baja eficiencia o poco entrecruzamiento entre las cadenas de la resina, un incremento entre los materiales usados, comparados con el material nuevo, sirven como indicador del grado de desenlace polimérico, un decremento puede indicar pérdida de funcionalidad o envenenamiento del material de intercambio iónico, debido a que el valor numérico es directamente dependiente de la forma iónica del material.

Densidad de retrolavado y sedimentación. Esta determinación en una cama que ha sido clasificada hidráulicamente y sedimentada fue descubierta para correlacionar con la densidad de materiales de intercambio iónico en unidades que estén operando, los resultados obtenidos por esta prueba en una columna de 2.54 centímetros de diámetro se puede esperar que estén de acuerdo con aquellas obtenidas en unidades de diámetro mayor, dentro de los límites de precisión de la prueba.

Distribución de tamaño de partículas. La distribución de tamaño de partícula de materiales de intercambio iónico está determinado en el estado de mayor hidratación y en la forma iónica que se conocen para poder proveer una base



reproducibile para comparación de cambios de tamaño debido a rompimientos de la partícula por el uso.

Contenido de cloruros, carbonatos y sulfatos de resinas intercambiadores aniónicos. Estas determinaciones son importantes debido al uso que se le da a la resina, así en la determinación de cloruros por ejemplo es importante su determinación cuando el cloruro en el agua tratada tiene principal importancia para el análisis de carbonatos, la concentración del ión residual carbonato, es usada como parte del proceso analítico para el monitoreo del grado de conversión de la forma del hidroxilo.

Porcentajes de regeneración de resinas de intercambio catiónico en su forma hidrógeno y porcentaje de regeneración de resinas de intercambio aniónico en su forma hidróxido. En el primer caso, esto nos sirve para la evolución de resinas cuando se ha usado ácido como regenerante, o puede ser usada como medida de eficiencia del proceso de regeneración. En ambos casos se toma como una medida de eficiencia del proceso de regeneración por el porcentaje relativo de grupos funcionales, en la forma de hidroxilo y base libre y formas salinas. Este método provee una distinción entre los grupos de partición de sales tales como hidroxilo deben con un cloruro de sodio y grupos de menor basicidad, los cuales no intercambian hidroxilo por cloruro pero los cuales son capaces de adsorber ácidos minerales libres.

Capacidad de intercambio. Una de las más importantes características de las resinas de intercambio iónico es la capacidad de intercambio total. Dado que la capacidad de intercambio total es una constante para una resina dada y debe de ser diferenciada de las capacidades de la columna cual define solamente el potencial de la resina para mover iones específicos bajo condiciones de uso con un valor dado de entrecruzamiento.



Esta capacidad se expresa en términos de mili equivalentes por gramo de resina, continuación nombramos las más importantes:

- Capacidad de partición de sales de resinas de intercambio catiónico.
- Capacidad total de la resina de intercambio catiónico
- Capacidad total y de partición de sales de resina de intercambio iónico

(Hein, 1981).

3.6 Problemas más comunes en resinas de intercambio iónico

3.6.1 Problemas provocados por la operación del equipo

Flujo excesivo a la entrada: Provoca fractura o resquebrajamiento en la resina por aumento de la presión, formación de valles y colonias en los lechos.

Retrolavado defectuoso. Si es violento causa crestas y valles en los lechos o bien pérdida de resina. Si es insuficiente no se eliminan los finos y la suciedad, causando baja en la capacidad de la resina. (Finos: Fragmentos de resina).

Mal control en el defecto del equipo. Pueden provocar los problemas antes mencionados y otros como los causados por un mal control en el ciclo de regeneración.



3.6.2 Problemas que provocan la degradación de la resina.

Las resinas de intercambio iónico por el uso, sufren tanto ataques químicos como físicos. El resultado del desgaste redundará en la pérdida de la capacidad de intercambio. Esto ocasiona baja en la eficiencia del proceso con el encarecimiento del mismo.

Los problemas más comunes son cuatro: Fracturas, incremento de humedad, contaminación y pérdida de funcionalidad química aunque nunca se presentan aislados, de hecho, las resinas tienen comúnmente al menos 2 de estos problemas.

Fracturas. Este fenómeno es el rompimiento de la resina, los pedazos de ella se conocen como finos. Los finos tienen baja capacidad de intercambio debido a la pérdida física de sitios activos.

Incremento de humedad. La humedad de las resinas es una medida de la cantidad de sólidos, en otras palabras, de la cantidad de materia inactiva. El incremento de humedad involucra pérdida de sitios activos. Se considera que el aumento en la proporción de humedad provocada por el rompimiento de enlaces entrecruzados. La humedad se incrementa en función del desgaste que sufra la resina. Se considera que un incremento del 3% sobre la especificación es alto.

Contaminación. Se considera “contaminación” aquel fenómeno causado por las especies químicas que evitan el funcionamiento de las resinas. La contaminación de las resinas puede ser superficial o provocada por iones que se fijan irreversiblemente en ellas, o aquellos que degradan o catalizan las reacciones de las resinas. Se pueden subdividir en tres casos: Ensuciamiento, azolvatamiento y envenamiento.

Ensuciamiento. Un fenómeno superficial, en el cual se depositan sobre la superficie de la resina compuestos suspendidos por ejemplo en el agua (materia orgánica, arena, flóculos, etc.), afecta a la resina en cuanto a que no se permite que en el agua no entre en contacto con la totalidad de la superficie de la resina.

• **Azolvatamiento.** Es un fenómeno de ensuciamiento localizado en los huecos que existen entre las esferas de la resina. Esto provoca la modificación de las



características hidráulicas del lecho intercambiador propiciando el deterioro de las esferas.

- **Envenenamiento.** Es un fenómeno en el cual las especies químicas reaccionan irreversiblemente con los sitios activos de la resina. También es la precipitación en el interior de la resina de ciertos hidróxidos o sales de metales y especies químicas, suspendidas o disueltas en el agua.

Pérdida de funcionalidad química. Este problema es provocado por alteraciones que sufre la resina en sus centros activos. Esos problemas se consideran causados por el envejecimiento del material del intercambio por las alteraciones físicas que produce su uso y también por la contaminación de los tres problemas antes mencionados.

3.7 Componentes que conforman el equipo de intercambio iónico

Los elementos básicos de una unidad comercial típica son:

1. Tanque vertical, que contiene la resina de intercambio iónico mas un espacio suficiente para la expansión de la resina en la etapa de contra lavado, Estos tanques se fabrican con placas de acero al carbón, recubiertos en su interior con materiales resistentes a ácidos y álcalis en el proceso de regeneración. En el caso de suavizadores se utilizan tanques sin recubrimiento. Las dimensiones comerciales varían de 30 cm a 300 cm., de diámetro con alturas de lecho de resina de 60 a 180 cm., Una vez calculado el volumen de resina se decidirá sobre las unidades a usar, así, como de sus dimensiones.

2. Distribuidores: se encuentran con tres tipos de estos.

- a) Distribuidor superior: Distribuye el flujo descendiente o colecta el flujo descendente en unidades pequeñas, estos equipos pueden consistir de tubos perforados o baffles y en equipos grandes se instalan equipos que además de distribuir el flujo evitan la fuga de resina por un mal retrolavado.



b) Distribuidores inferiores: Distribuyen el flujo descendente. Para mantener una buena distribución de flujo durante todo el lecho del intercambiador de iones, los distribuidores superiores deben ser compatibles con el diseño del colector inferior.

c) Distribuidores de regenerante: Generalmente consisten en una serie de tubos, en las perforaciones tienen un tamaño y un número requerido para mantener una caída de presión que permita que el flujo de regenerante cubra el área total del lecho. Este distribuidor se coloca a 15 cm., arriba del nivel superior del intercambiador de iones en su forma iónica agotada que tenga el volumen mayor.

El volumen de las resinas cambia en función de la forma iónica, por eso importante tomar en cuenta el cambio de volumen en sus diferentes formas iónicas, y de este modo evitar colocar el distribuidor en una sola que de una mala distribución del flujo regenerante.

Estos distribuidores deberán fabricarse con materiales resistentes a la corrosión a la acción de ácidos y sosa caustica.

3. Controles:

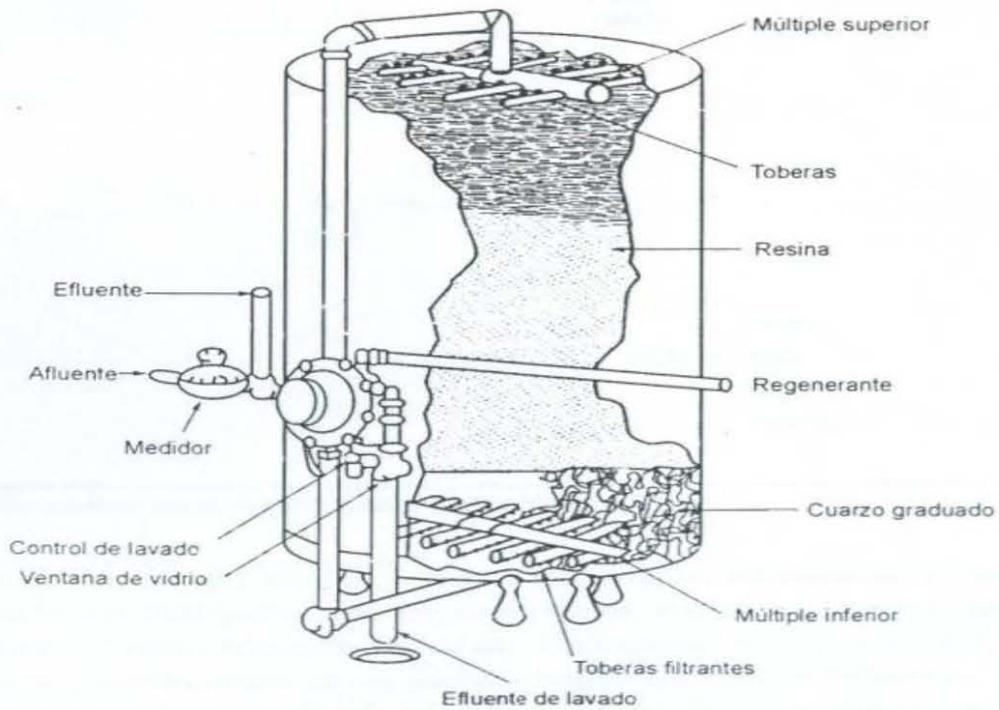
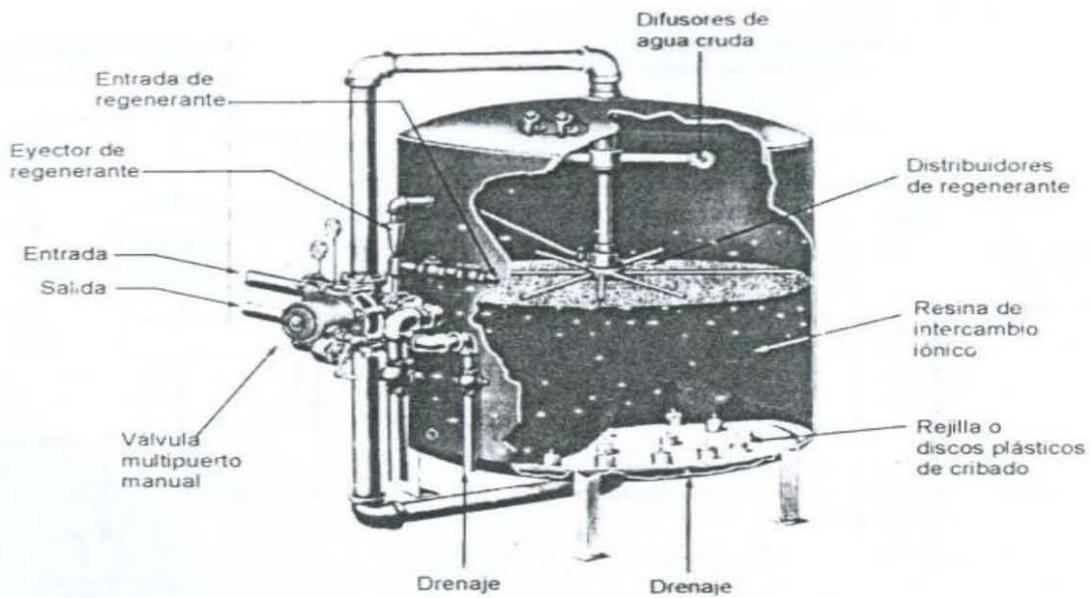
a) Controles de flujo: Es importante colocar los controles de flujo en la entrada de las unidades, para medir con la mayor precisión los flujos de servicio, retrolavado, enjuague y agua de dilución de regenerantes.

b) Conductímetro: Normalmente se colocan conductímetros a la salida de las unidades anónicas que determinan la calidad del producto y también detectan el proceso de enjuague.

c) Válvulas: Estas servirán únicamente para controlar flujos y una distribución adecuada en el sistema. Para evitar las confusiones, toda válvula usada en el sistema hidráulico debe ser seleccionada adecuadamente, las cuales deben de contar con indicadores de posición.



Figura 11: Columna de intercambio iónico



Fuente: Romero, 2005





CONCLUSIONES

Tal como se ha visto durante el desarrollo de este trabajo de tesis podemos concluir que:

- México es un importante productor y consumidor de azúcar a nivel mundial ocupando el sexto lugar en este rubro.
- Las clases de azúcar producidas en México son: azúcar crudo de caña o azúcar estándar, Azúcar Blanco Popular y Azúcar Refinada.
- El azúcar se obtiene de 2 fuentes principales que son la caña de azúcar y la remolacha azucarera.
- Las principales aplicaciones del azúcar en la industria de alimentos son: en productos de panificación, confitería, mezclas secas, bebidas y farmacéutica de acuerdo a sus propiedades funcionales como edulcorante, bajo contenido de humedad y cenizas.
- El proceso de elaboración del azúcar crudo de caña consta de 12 operaciones unitarias de las cuales la etapa de clarificación es donde se determina el grado de color necesario para definir que clase de azúcar se obtendrá (azúcar crudo de caña o estándar o azúcar blanco popular), para el caso del azúcar refinada se tiene que adicionar el proceso de refinación que consta de 3 operaciones unitarias (disolución del crudo, clarificación y centrifugación).
- Los colorantes del azúcar se dividen 3 categorías: pigmentos vegetales, materiales del tipo de melanoidinas y materiales derivados de la caramelización y su clasificación química es: moléculas iónicos/aromáticos, Iónicos/no aromáticos, No iónicos/aromáticos y No iónicos/no aromáticos y de las cuales nos permiten seleccionar el mecanismo de adsorción por el cual serán eliminados.



- Después de analizar los mecanismos de adsorción en el capítulo 3, el mecanismo de intercambio de iones por medio de un grupo iónico funcional presenta las siguientes ventajas con respecto a los otros dos:

6. Retiro de moléculas colorantes del 90% aproximadamente.

7. Retiro de sólidos solubles (cenizas)

8. Inversión controlada

9. Exclusión de iones

10. Substitución selectiva de iones

- El método de intercambio iónico es una operación unitaria física regida por transferencia de materia que consiste en la sustitución de uno o varios iones de una disolución por otros que inicialmente forman parte de la llamada resina de intercambio iónico.
- En toda operación que hay intercambio iónico hay reacción química, una reacción química lo suficientemente rápida que lo que rige la velocidad del proceso es la diferencia de concentraciones entre los componentes (difusión).
- Las resinas son neutras y formadas por iones; al ponerse en contacto con el fluido se produce un intercambio iónico que produce dos tipos de resinas: Resinas catiónicas: el anión es fijo e intercambian el catión; Resinas aniónicas: el catión es fijo e intercambian el anión.

Por lo cual el método de intercambio iónico es una tecnología adecuada para hacer más eficiente el proceso de refinación de azúcar crudo de caña tanto en sólido como en una variante de producto terminado que es azúcar refinado líquido.



ANEXO I

Determinación del color ICUMSA

El Color ICUMSA, es proporcional a la absorbancia de las sustancias que imparten color en una solución de azúcar. El color presente en una solución es determinado a 420 nanómetros. Este método puede aplicarse a azúcares cristalinos o en polvo y jarabe de sacarosa que no tengan aditivos. El azúcar se disuelve para lograr una solución de concentración °Brix conocida (recomendándose de 23.7°Brix para disminuir el tiempo de filtración).

MATERIAL, EQUIPO Y REACTIVOS.

- Espectrofotómetro.
- Celda espectrofotométrica de 2.54cm de longitud.
- Bomba de vacío.
- Equipo de filtración al vacío capaz de utilizar membranas de 0.45 micras y 48mm de diámetro.
- Vaso de 250 ml o un recipiente equivalente.
- Parrilla de agitación
- Agitador magnético
- Balanza capaz de medir $\pm 0.01g$.
- Juego de membrana y soporte de 48mm de diámetro y de 0.45 micras de poro.
- Agua bidestilada.



PROCEDIMIENTO.

Si se parte de azúcar en estado sólido.

Se pesan exactamente 23.70g (± 0.010 g) de azúcar en el vaso de 250 ml, se pesan 76.30g de agua bidestilada en el mismo recipiente, así elaborará una solución de 100 mL y aproximadamente 23.7°Brix. (Otra manera de hacer una solución de 23.7°Brix es pesar 26g de azúcar y aforar a 100 mL de agua).

Agitar hasta disolver completamente. Es muy importante verificar en el refractómetro que la solución tenga esa concentración en °Brix, de no ser así AJUSTAR.

Filtrar la muestra con ayuda de un equipo de filtración al vacío con una membrana y tamaño de poro de 0.45 micras.

Hacer lectura de la muestra filtrada en el espectrofotómetro previamente calibrado, a una absorbancia de 420 nm, cuidando que la muestra esté perfectamente disuelta y sin burbujas de aire que interfieran la determinación.

Si se parte de una solución de azúcar a una concentración conocida.

Se deberá ajustar dicha solución hasta llegar a los 23.7°Brix de la siguiente manera:

$23.7 / \text{°Brix de la muestra} * 100 = \text{cantidad de muestra a pesar y ajustar con agua a 100g}$, así se tiene una solución de 23.7 °Brix.

La muestra se agita hasta disolver para después Filtrar la muestra con ayuda de un equipo de filtración al vacío con una membrana y tamaño de poro de 0.45 micras.



Hacer lectura de la muestra filtrada en el espectrofotómetro previamente calibrado, a una absorbancia de 420 nm, cuidando que la muestra esté perfectamente disuelta y sin burbujas de aire que interfieran la determinación.

Cálculo y expresión de resultados.

El cálculo de Color se hace de la siguiente manera:

$$\text{COLOR(U.I.)} = \frac{(\text{Abs420F})(1000)}{(b)(c)}$$

Donde:

- Abs420 F = absorbancia a longitud de onda de 420 nm.
- 1000 = factor para convertir el índice de absorbancia a U.I.
- b = longitud de la celda de la muestra en cm, en este caso es 2.54cm.
- c = concentración de sólidos de la muestra en g/mL. Si la solución se realizó correctamente, y si tiene la concentración de 23.7°Brix es igual a 0.2599 g/ml.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Ayala León M. A: "Decoloración-deodorización industrial de jarabes de azúcar". Editado por CONACYT, México, 2003.
2. Badui Dergal, S.: "Química de los Alimentos". Pearson Educación, 4ª edición, México, 2006.
3. Bender, A: "Diccionario de Nutrición y Tecnología de los Alimentos". Acribia. Zaragoza, España 1994.
4. Brauerman, J.: "Introducción a la Bioquímica de los Alimentos". Editorial el manual moderno. México 1976.
5. Cheftel J.: "Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos". Volumen I. Editorial Acribia. Zaragoza, España 1988.
6. Chen, James: "Manual del Azúcar de Caña para Fabricantes de Azúcar de Caña y Químicos Especializados". LIMUSA, México 1999.
7. Coultate: "Manual de Química y Bioquímica de los Alimentos". Acribia, España, 1998.
8. Desrosier W.: "Elementos de Tecnología de Alimentos". 13ª edición. Editorial CECOSA Continental. México, 1998.
9. Fahasmane G.: "De la Caña al Ron". Acribia, España, 2005.
10. Farr Gordon, M.: "Purificación de aguas y tratamiento remoción de aguas residuales". Limusa, México 1976.
11. Fundación Produce Veracruz (FUNPROVER); Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, (SAGARPA). México, 2003
12. Geankoplis J.: "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarios". Continental 7 edición, México 2005.
13. Georget, Austin: "Manual de Procesos Químicos en la Industria". Tomo III 5ª edición Mc Graw – Hill. México 1990.
14. Humbert P. Roger: "El cultivo de la Caña de Azúcar". Continental. México 1988
15. Lagunes, M.: "Investigación y Desarrollo de Proceso, azúcar refinado líquido para un ingenio azucarero mexicano". Publicado por CONACYT, México, 2004.



16. Li Loo Kung, Carlos: "La ingeniería de los alimentos y el proceso de refinación de azúcar". Tesis para nivel licenciatura en Ingeniero en industrias alimentarias, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Quito Perú, 2002.
17. Linden; Lorient: "Bioquímica Agro industrial revaloración alimentaría de la producción agrícola". Acribia. Zaragoza, España 1996.
18. Luna Gonzáles, Enrique A.: "Optimización de las condiciones de operación para la clarificación y decoloración de jarabe a 60 °Brix elaborado con azúcar estándar". Tesis para nivel licenciatura en Ingeniería en Alimentos, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, Estado de México, 1995.
19. Manual sobre la comercialización internacional del azúcar. Publicación del grupo de países latinoamericanos y del caribe exportadores del azúcar. Segunda edición. México, 1985.
20. Mazaeda, Prada "Real Time on Line Optimization of a Sugar Factory". 22th General Assembly of the CITS, Madrid, 2003
21. McCabe, Smith, Harriot. "Operaciones unitarias de Ingeniería Química". McGraw-Hill, Madrid, 2005.
22. Moreiras, Olga: Tablas de composición de alimentos. 10a edición. Editorial Piramide. Madrid, 2006.
23. Pennington Net. L: "Sugar: A user's guide to sucrose". Editorial Van Nostrand Reinhold. New York 1990.
24. Perry, Green: "Manual del ingeniero químico". Volumen IV. Editorial McGraw-Hill, Madrid, 1992.
25. Redhead J.: "Utilización de alimentos tropicales: Azúcar, especies y estimulantes". Editado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación. Roma, 1990.
26. Rigola Lapeña Miguel: "Tratamiento de aguas industriales, Aguas de proceso y residuales". Alfa Omega. México, 1999.
27. Romero, A.: "Purificación de agua". Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia 2005.
28. Sánchez Pineda I.: "Procesos de elaboración de alimentos y bebidas". Mundi Prensa. Madrid, 2003.



29. Santos Moreno, Armando: “Química y bioquímica de los alimentos”. Editado por la Universidad Autónoma de Chapingo. México, 1995.
30. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, (SAGARPA). Comunicado 137/2008. México
31. Spellman R, Frank; Drian Joanne: “Manual del Agua Potable”. Acriba S.A. Zaragoza España, 2000.
32. Tscheuschner, N.D: “Fundamentos de Tecnología de Alimentos”. Acribia. España, 2001.
33. Vaiman, H.: “Bebidas: tecnología, química y microbiología”. Acribia. Zaragoza, España 1997.
34. Vollmer, G.: “Elementos de bromatología descriptiva”. Acribia. Zaragoza, España 1999.