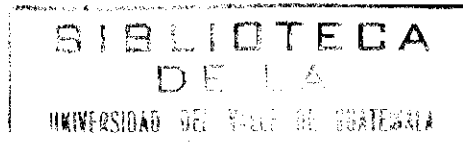


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Departamento de Ingeniería Química

**Determinación de un método de adsorción para la  
eliminación de color y fragancia de una mezcla de parafina**



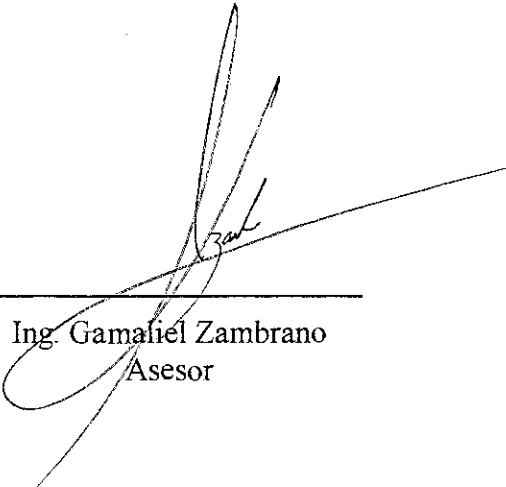
Ana Cecilia González Casellas

Trabajo de graduación presentado para optar al grado académico de  
Ingeniería Química

Guatemala, Julio del 2000

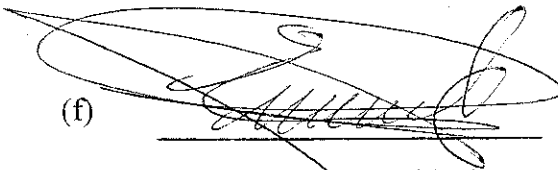
Vo.Bo.:

(f)

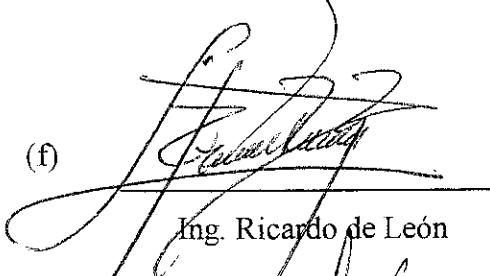
  
Ing. Gamaliel Zambrano  
Asesor

Tribunal:

(f)

  
Ing. Eduardo Calderón

(f)

  
Ing. Ricardo de León

(f)

  
Ing. Gamaliel Zambrano

Fecha de aprobación: 12 de Julio del 2000

## RESUMEN

En este trabajo se determinó un método de adsorción para eliminar el color y la fragancia de una mezcla de parafina. Se trabajó con cuatro tipos de materiales adsorbentes, y se estableció que el carbón activado Suchar es el que remueve la mayor cantidad de colorantes y fragancias. Después de establecer el material de trabajo, se hicieron pruebas para encontrar las condiciones mas apropiadas para el proceso, y se encontró que la temperatura de trabajo es de 120°C, con un tiempo de residencia de 2 horas y una concentración de 0.4% (peso/peso) de carbón activado Suchar.

Basándose en los datos obtenidos experimentalmente, se diseñó un equipo que se puede utilizar para la eliminación del color y fragancia. Se estableció un tamaño de lote de 600kg de mezcla de parafina, dimensionando el tanque, el agitador, el filtro prensa, la banda transportadora para alimentar la parafina, y las tuberías para el vapor y líquido condensado. También se estableció que para cada lote se debe verificar que después de dos horas el color sea aceptable, ya que si se depende del color inicial de la mezcla, puede ser necesario variar el tiempo de residencia.

El carbón activado que se obtiene después del proceso de filtración, no se volverá a utilizar debido a que se encuentra en forma de sólida, y es necesario realizar otro proceso para poderlo reutilizar.

## INDICE GENERAL

		<b>Página</b>
I.	INTRODUCCIÓN _____	1
II.	ANTECEDENTES _____	2
	A. Candelas Aromáticas _____	2
	La producción en baño de inmersión _____	2
	Velas rectilíneas _____	3
	Velas y cirios de cera de abeja _____	3
	Velas perfumadas _____	4
	Velas de molde _____	4
	B. Materiales _____	4
	Cera de parafina _____	4
	Cera de abeja _____	6
	Ácido esteárico _____	6
	Fragancia para velas _____	7
	Tintas para la cera _____	7
	C. Adsorción _____	7
	Tipos de adsorción _____	8
	Materiales adsorbentes _____	9
	Propiedades de los materiales adsorbentes _____	11
	D. Diseño de sistemas de adsorción _____	14
	Equilibrio _____	14
	Isotermas _____	15
	Dinámica de adsorción _____	16

III.	JUSTIFICACIÓN	18
IV.	OBJETIVOS	19
	A. Generales	19
	B. Específicos	19
V.	PROBLEMA A RESOLVER	20
VI.	METODOLOGÍA	21
VII.	RESULTADOS	24
VIII.	DISCUSIÓN	26
IX.	CONCLUSIONES	33
X.	RECOMENDACIONES	35
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	36
IX.	ANEXOS	37
	A. Datos	38
	B. Cálculos	39

## INDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla #1: Adsorbentes de uso general _____	9
Tabla #2: Dimensiones del tanque de acero inoxidable 316 _____	24
Tabla #3: Dimensiones del agitador con rodete tipo marino _____	24
Tabla #4: Datos de requerimientos de energía para el proceso adsorción para un lote de 600kg de parafina _____	25
Tabla #5: Datos teóricos de la parafina _____	38
Tabla #6: Datos teóricos del carbón activado _____	38
Tabla #7: Datos teóricos del vapor utilizado como medio de calentamiento en el proceso _____	38

## INDICE DE GRÁFICAS Y FIGURAS

	<b>Página</b>
Gráfica #1: Escala de color para la mezcla original, la parafina blanca y la mezcla de parafina después de ser tratada con carbón activado _____	24
Gráfica #2: Datos de color obtenidos con diferentes carbones activados	38
Gráfica #3: Datos de color obtenidos con carbón activado Suchar a distintas concentraciones _____	39
Figura #1: Esquema del sistema a utilizar _____	25

## I. INTRODUCCIÓN

La industria de las velas aromáticas ha tenido mucho desarrollo en los últimos años, debido a la creciente demanda de estos productos. El proceso que se realiza actualmente en Guatemala, tiene partes en las cuales se produce mezcla de parafina con aditivos que no se utiliza como producto final que llega al cliente. Entre los aditivos que tienen estas mezclas de parafina se encuentran los colorantes y la fragancia, que limitan mucho el uso que se le puede dar a este material.

Se desea encontrar un método para eliminar el color y la fragancia de la mezcla de parafina, que da como resultado un producto que se puede utilizar como materia prima para hacer cualquier vela. La adsorción es un método que aprovecha las propiedades de ciertos materiales para "atrapar" algunos compuestos y dejar libres los demás. Generalmente, los materiales adsorbentes retienen moléculas grandes en sus poros, y esto es lo que sucederá con la fragancia y colorantes, se quedarán en los poros del material adsorbente y dejarán la mezcla de parafina purificada.

Entre los materiales adsorbentes que se encuentran disponibles en el mercado, se trabajará con tres materiales considerados y son aquellos cuyas propiedades los hacen más apropiados para el uso que se les va a dar. Se realizarán pruebas a varias temperaturas para determinar la temperatura más adecuada para la adsorción, y se establecerá el tipo de material más apropiado.

Para hacer una buena evaluación, se elaborará una escala de color, que servirá como guía para determinar qué material adsorbente elimina mayor cantidad de colorantes. Esta escala se realizará con la ayuda de un colorímetro marca HunterLab. Para determinar el contenido de fragancia que quede en la mezcla, se hará una evaluación por comparación entre el contenido inicial y el final, para establecer una escala de olor.

## II. ANTECEDENTES

### A. CANDELAS AROMÁTICAS

Antiguamente, las velas y los cirios se hacían sumergiendo juncos en sebo, una grasa animal que produce humo negro y un fuerte olor al quemarse. Después, con cera de abejas se hicieron velas de mejor calidad, pero sólo los ricos y los clérigos podían adquirirlas. No fue hasta mediados del siglo XIX que el desarrollo de la estearina como compuesto químico, originariamente producido a partir de grasa refinada, cambió la técnica de fabricación de las velas, proporcionándoles una vida más larga y mejorando su olor. (2)

El arte de hacer velas y la manera de diseñarlas ha evolucionado mucho desde los días en que las velas eran el único medio con que contaba la gente para iluminar sus casas. Hoy, hay velas de tantos tamaños, formas y colores que es casi imposible imaginar alguna que no se pueda encontrar. (2)

#### **La producción en baño de inmersión**

Las velas más tradicionales son aquellas que se fabrican por el método del baño. Así se han hecho las velas y los cirios durante siglos. El proceso consiste en tender una mecha dentro de un recipiente lleno de cera fundida. La mecha empapada se deja secar después de cada baño y el proceso se repite. Cada vez que la mecha es introducida en el baño de cera, la pieza va tomando forma gradualmente. Las velas resultantes pueden ser muy delgadas y de forma puntiaguda, largas o tan cortas como se desee, eso depende sólo de la longitud de la mecha. (2)

Las velas de inmersión se hacen generalmente en pares, si bien es posible bañarlas individualmente. Cuando se fabrican a nivel industrial se utilizan unos marcos que sirven para bañar varias veces a la vez. (2)

### **Velas rectilíneas**

La mayor parte de las velas fueron fabricadas por inmersión hasta que se desarrolló la estearina o ácido esteárico a principios del siglo XIX. Se descubrió que esta sustancia era un excelente agente reductor para la cera, lo que permitiría moldear velas de forma cilíndrica y, por consiguiente, de muchas otras formas. La estearina ayuda también a impedir el goteo de las velas. Tras haberse descubierto sus propiedades, todo el proceso se hizo más refinado y el resultado fue el de conseguir velas de una calidad muy superior. Al igual que las velas de inmersión, las rectilíneas se pueden encontrar en una enorme gama de colores y fragancias. La mayoría de ellas se fabrican en tamaño estándar para que puedan adaptarse a los distintos tipos de candeleros. (2)

### **Velas y cirios de cera de abeja**

La cera de abeja tiene un olor muy agradable cuando se quema, y en su estado natural, tiene un color miel muy característico. Aunque cuesta más que la cera de parafina, es preferible porque puede quemar durante mucho más tiempo. (2)

La cera es un subproducto de la cría de abejas y el arte de hacer velas antes iba de la mano de los apicultores. A diferencia de la cera de parafina, la de abeja tiene una gran cualidad adherente cuando se trabaja, lo cual quiere decir que las velas de pura cera de abeja necesitan generalmente ser bañadas o enrolladas. Algunas velas de cera de abeja pueden ser moldeadas, pero debe usarse un agente especial antiadherente en el interior del molde o sería casi imposible sacar la vela del molde una vez endurecida. (2)

Al ser comparativamente cara, sólo se usa en pequeñas cantidades para mejorar la calidad de la cera de parafina utilizada en la fabricación de velas de baño o moldeadas. Se puede añadir la cantidad que se desee. Generalmente, la cera de abeja se compra en paneles. En el mercado se suele encontrar en su

estado natural, pero también la hay en color verde, rojo, blanco, azul brillante y en tonos pastel. (2)

### **Velas perfumadas**

Al igual que las velas de cera de abeja, perfumadas de manera natural, se pueden comprar velas a las que han sido añadidos aceites esenciales para impregnar con su fragancia el ambiente mientras se queman. Hay una gran variedad de perfumes o fragancias, que pueden tener efectos vigorizantes, refrescantes o utilitarios. (2)

### **Velas de molde**

Las velas pueden moldearse en casi cualquier forma imaginable. Algunas de las que producen más efecto son aquellas que imitan formas naturales y son reconocibles como objetos, pero que no representan exactamente aquello que se esperaría de una vela, por ejemplo piñas, castañas, avellanas, hojas, plumas, ramas y troncos. (2)

## **B. MATERIALES**

El material más importante en la fabricación de velas es la cera. También se tiene una variedad de compuestos que se pueden agregar a la mezcla para mejorar las características de la vela.

### **Cera de parafina**

Esta es la cera básica en la manufactura de velas. Es un subproducto del refinado del petróleo, incoloro e inodoro. La cera de parafina se vende generalmente en grano o en pastillas y funde a una temperatura entre 40 y 71°C.

A menudo tendrá que añadirse estearina u otro aditivo a la cera, para mejorar sus características físicas y la forma en que quema. (2)

Nuevos mercados se siguen expandiendo para la parafina y ceras derivadas del petróleo. La elaboración de velas es uno de los grandes usos que se le da a éste tipo de ceras, debido a la gran demanda que tienen por sus variados usos, entre los que están motivos religiosos y decoración. (1)

La parafina y el petrolato están entre los derivados del petróleo que primero se produjeron. Se separaban del destilado de cera, que era la fracción de alto punto de ebullición del crudo, que se trataba en las refinerías. Actualmente, se utilizan solventes y centrifugación para separar estos productos, junto con nueva tecnología. Se obtienen parafinas cuyos puntos de fusión se encuentran, generalmente, entre 49 y 60°C (se pueden obtener parafinas con punto de fusión más alto por procesos de refinamiento). La parafina es dura y quebradiza, y presenta una tendencia a solidificarse formando cristales grandes. (1)

Las ceras microcristalinas tienen un punto de fusión más alto que las parafinas, y se solidifican formando pequeños cristales con forma de aguja. Algunos tipos son maleables. Estas ceras se producen en cantidades mucho más pequeñas, y tienen varias aplicaciones. En la industria de velas aromáticas se utiliza como un aditivo que ayuda a retener la fragancia en la mezcla de parafina y a que la contracción de la vela sea más uniforme. (1)

Comercialmente se reconocen dos grados de refinamiento en la parafina: escala cruda y completamente refinada. La parafina de escala cruda tiene un punto de fusión entre 48 y 57°C, un color más oscuro que +21 y más del 0.5% de aceite. La parafina completamente refinada tiene un punto de fusión entre 48 y 65°C, un color de +21 o más claro y menos del 0.5% de aceite. (1)

Los procedimientos analíticos para realizar pruebas a las ceras del petróleo son de dos tipos: los que miden sus propiedades físicas y los que miden sus propiedades de desempeño o funcionamiento. Entre los procedimientos establecidos por el ASTM están los siguientes:

- Punto de fusión (ASTM D87, D127): Esta propiedad es muy importante para determinar el uso de una parafina. Como la parafina es una mezcla de hidrocarburos de diferente punto de fusión, el punto de fusión generalmente se da como un intervalo de temperaturas.
- Color (ASTM D156): El color en la parafina es un índice de su grado de refinamiento; y se le mide a la parafina con un colorímetro Saybolt.
- Contenido de aceite (ASTM D721): Este método utiliza la metil-etil-cetona como solvente y se aplica a parafinas cuyo punto de fusión sea de 41°C o mayor, y que no contengan más del 15% de aceite. Mide la diferencia de solubilidad del aceite y la parafina bajo condiciones específicas.
- Penetración de aguja (ASTM D1321): Esta evaluación relaciona la consistencia de la parafina o de la cera microcristalina, con la penetración que tiene una aguja estándar en el material. (1)

### **Cera de abeja**

Este producto, completamente natural, puede adquirirse en su habitual tono marrón o blanqueado. Es muy caro, pero su precio se ve compensado por su agradable olor. Generalmente, se usa en combinación con otras ceras para aumentar su duración. Resulta muy caro hacer velas de cera de abeja por el sistema de baño de inmersión, puesto que se requiere de una gran cantidad de cera. Las planchas de cera de abeja son particularmente útiles para hacer velas de rollo. (2)

### **Ácido Esteárico**

Este producto se usa como aditivo a la cera de parafina para incrementar sus propiedades de reducción; es decir, para que la cera, una vez enfriada, pueda

desmoldarse con más facilidad. También contribuye a disminuir el goteo de las velas. (2)

### **Fragancia para velas**

Se trata de esencias aromáticas especialmente elaboradas para añadir a la cera en el proceso de manufactura de las velas. Pueden utilizarse también aceites aromáticos normales de perfumería, pero no llegan a expandir una fragancia notable cuando se queman. Deben vertirse unas pocas gotas cuando haya fundido la cera, debe procurarse no excederse, porque los excesos con las esencias aromáticas suelen resultar desagradables al olfato. (2)

### **Tintas para la cera**

Para tintar cera puede escogerse entre una extensa gama de colores, mediante la utilización de tintes especiales en forma de disco o de polvo. Por regla general, los fabricantes recomiendan la cantidad adecuada de tinte que hay que utilizar para una determinada cantidad de cera, pero realmente depende del tono que se quiera conseguir. Para colorear una vela realizada por baño de inmersión, éste deberá estar muy cargado de tinte para ser efectivo. (2)

## **C. ADSORCIÓN**

Las operaciones de adsorción explotan la capacidad especial de ciertos sólidos para hacer que sustancias específicas de una solución se concentren en la superficie de la misma. De esta forma, pueden separarse unos de otros componentes de soluciones gaseosas o líquidas. En el campo de las separaciones gaseosas, la adsorción se utiliza para deshumidificar aire y otros gases, para eliminar olores e impurezas desagradables de gases industriales y otros. Las separaciones típicas de líquidos incluyen la eliminación de humedad

disuelta en gasolina, decoloración de productos de petróleo y soluciones acuosas de azúcar, eliminación de olores desagradables del agua y otros. (3)

En todas éstas operaciones la mezcla por separar se pone en contacto con otra fase insoluble, el sólido adsorbente, y en que la distinta distribución de los componentes originales entre la fase adsorbida en la superficie sólida y el fluido permite que se lleve a cabo una separación. Se tienen separaciones por lotes en una sola etapa, separaciones continuas en varias etapas y se pueden aplicar métodos semi-continuos. (3)

### **Tipos de adsorción**

Se debe distinguir entre dos tipos de fenómenos de adsorción: físicos y químicos. La adsorción física es un fenómeno fácilmente reversible, y se da como resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida. La sustancia adsorbida no penetra dentro de la red cristalina ni se disuelve en ella, sino que permanece totalmente sobre la superficie. Si el sólido es muy poroso y contiene muchos pequeños capilares, la sustancia adsorbida penetrará en estos intersticios si es que la sustancia humedece el sólido. Las operaciones industriales de adsorción dependen de su reversibilidad para recuperar el adsorbente, para la recuperación de la sustancia adsorbida o para el fraccionamiento de mezclas. (3)

La quemisorción o adsorción activada, es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. La fuerza de adhesión es generalmente mucho mayor que la observada en la adsorción física. El proceso muchas veces es irreversible; y en la desorción se descubre que la sustancia original ha sufrido un cambio químico. La misma sustancia que en condiciones de baja temperatura, sufrirá esencialmente sólo la adsorción física sobre un sólido, algunas veces exhibe quemisorción a temperaturas más elevadas. También se pueden dar los dos tipos de adsorción al mismo tiempo. (3)

## Materiales adsorbentes

Los sólidos adsorbentes por lo general se utilizan en forma granular, y varían de tamaño desde 12mm de diámetro hasta granos tan pequeños como 50 $\mu$ m. La naturaleza química del sólido tiene mucho que ver con sus características de adsorción; aunque sólo su composición química no es suficiente para caracterizar su utilidad. Una característica de los materiales adsorbentes es tener una gran superficie por unidad de peso para que sean útiles. En particular, la superficie significativa no es la superficie total de las partículas granulares, sino la superficie mucho mayor de los poros internos de las partículas. Hay muchas otras propiedades que son evidentemente de gran importancia y que no se comprenden totalmente; por lo que se tiene que depender en gran medida de la observación empírica para reconocer la capacidad de adsorción. Los principales adsorbentes de uso general se presentan en la tabla #1. (3)

Tabla #1: Adsorbentes de uso general (3)

<b>NOMBRE</b>	<b>USOS</b>
Tierras de Fuller	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son arcillas naturales, principalmente silicatos de aluminio y magnesio.</li> <li>• Útiles para decolorar, neutralizar y secar productos del petróleo, como aceites y gasolina.</li> <li>• Se pueden utilizar varias veces, lavando y quemando la materia orgánica adsorbida sobre la arcilla durante su utilización</li> </ul>
Arcillas activadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son bentonita u otras arcillas que no adsorben hasta después de activarse por medio de un tratamiento con ácido sulfúrico o clorhídrico.</li> <li>• Útiles para decolorar productos del petróleo.</li> <li>• Se desechan después de una sola aplicación.</li> </ul>
Bauxita	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una forma de alúmina hidratada natural que se activa al calentarse entre 450 y 1500°F.</li> <li>• Se utiliza para decolorar productos del petróleo y para sacar gases.</li> <li>• Se reactiva mediante calentamiento.</li> </ul>
Alúmina	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un óxido de aluminio hidratado, duro, que se activa al calentarlo y eliminar la humedad.</li> <li>• Utilizado como desecante de gases y líquidos.</li> <li>• Puede reactivarse y volverse a utilizar.</li> </ul>
Carbón de hueso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtiene por la destilación de huesos pulverizados y secos a temperaturas de 600-900°C.</li> <li>• Utilizado en la refinación de azúcar.</li> <li>• Se lava y quema para volverse a utilizar.</li> </ul>

Carbones decolorantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se pueden preparar de varias formas, utilizando materia vegetal, materia orgánica, lignita o carbón bituminoso.</li> <li>• Se utilizan para muchos fines, como purificación de agua.</li> </ul>
Carbón adsorbente de gases	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se prepara por carbonización de cáscaras de coco, semillas de fruta, carbón, lignita y madera. Se activa por un proceso de oxidación parcial con aire o vapor caliente.</li> <li>• Utilizado para recuperar vapores de disolventes en mezclas gaseosas y en el fraccionamiento de gases de hidrocarburos.</li> <li>• Se puede volver a utilizar evaporando el gas adsorbido</li> </ul>
Carbón activado de malla molecular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una forma preparada especial con aberturas de poro controladas, que van desde 5 hasta 5.5 Angstroms.</li> <li>• Útil para fraccionar compuestos acetilénicos, alcoholes, ácidos orgánicos, cetonas, aldehídos y muchos otros.</li> </ul>
Adsorbentes poliméricos sintéticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son perlas esféricas porosas, 0.5mm de diámetro; cada perla es un conjunto de microesferas de <math>10^{-4}</math>mm de diámetro. Son de material sintético, fabricado de monómeros polimerizables.</li> <li>• Útiles para la adsorción de orgánicos no polares a partir de soluciones acuosas.</li> <li>• Se regeneran por lixiviación con alcoholes o cetonas de bajo peso molecular.</li> </ul>
Silica gel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Producto duro, granular, muy poroso; preparado a partir del gel precipitado por tratamiento ácido de una solución de silicato de sodio.</li> <li>• Utilizado principalmente para deshidratación del aire y otros gases, y para el fraccionamiento de hidrocarburos.</li> <li>• Se puede revivir por evaporación de la materia adsorbida.</li> </ul>
Mallas moleculares	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son cristales de zeolitas sintéticos, porosos, aluminosilicatos metálicos. Pueden separar de acuerdo al tamaño molecular, y también por adsorción dependiendo de la polaridad molecular y del grado de insaturación.</li> <li>• Útiles para deshidratar gases y líquidos y para la separación de mezclas de hidrocarburos gaseosos.</li> <li>• Se regeneran por calentamiento o elución</li> </ul>

Los carbones se activan al remover hidrocarburos por pirólisis. Esta remoción produce una distribución de poros internos que aumenta la capacidad de adsorción de la superficie del carbón. Variando las condiciones de activación, se obtienen diferentes superficies internas. La distribución del tamaño de poros y el área superficial, características de la superficie externa y la composición química, todos afectan grandemente la capacidad, selectividad, regenerabilidad, cinética, compatibilidad y costo. Actualmente se están utilizando carbones activados de malla molecular, que tienen microporos con aberturas alargadas, que aumentan su selectividad en varias situaciones de procesos. (4)

Los adsorbentes poliméricos vienen en varias formas; y entre los que tienen más tiempo de utilizarse están los copolímeros inertes de poliestireno y los de divinilbenceno de forma esférica y de alto volumen de poro. La principal desventaja de estos adsorbentes es que cuestan alrededor de diez veces lo que cuestan los demás adsorbentes comerciales; lo cual limita su uso a situaciones que requieren desempeños altos que no pueden obtenerse con los adsorbentes menos caros. (4)

Seleccionar el adsorbente adecuado para una separación dada puede ser la diferencia en qué tan bien funcione la adsorción. Las características que se buscan en un adsorbente son capacidad, selectividad, regenerabilidad, cinética, compatibilidad y costo. Es muy raro que un material específico sea óptimo en todos estos aspectos. (4)

## **Propiedades de los materiales adsorbentes**

### **Capacidad**

La capacidad o carga es la cantidad de adsorbato que elimina el adsorbente por unidad de masa o volumen de adsorbente. Esta es generalmente la característica más importante del material, ya que afecta grandemente el costo del equipo al determinar la cantidad de adsorbente requerido y el volumen del reactor. Para un adsorbente específico, la capacidad depende principalmente de la concentración de la fase fluida, temperatura y condición inicial del adsorbente. (4)

La capacidad se expresa por varios índices, como el área superficial, la distribución del tamaño de poro, el número de Yodo y el número de Melazas. Los últimos dos índices se utilizan únicamente para carbones activados. (4)

El área superficial es un término relativo, cuyos valores se encuentran entre 5 y 3000 m<sup>2</sup>/g. Estos valores se pueden correlacionar bien con la capacidad, y hay información en la literatura acerca de los valores para los adsorbentes más usados. (4)

La distribución del tamaño de poro es una propiedad que indica la fracción de espacio ocupado por microporos ( $d_p < 20 \text{ \AA}$ ), mesoporos ( $20 \text{ \AA} < d_p < 500 \text{ \AA}$ ), y macroporos ( $d_p \geq 500 \text{ \AA}$ ). Esta distribución se puede correlacionar tanto con la capacidad como con la cinética, aunque las relaciones son complejas. (4)

El número de Yodo es una medida de la capacidad para adsorber moléculas pequeñas, y se relaciona directamente con el área superficial. El número Melazas, desarrollado en la decoloración de caña de azúcar, se relaciona con la adsorción de moléculas grandes de un líquido. (4)

### **Selectividad**

La selectividad es la razón de la capacidad de un adsorbente para un compuesto contra su capacidad hacia otro; a una concentración de fluido dada. Mientras más pequeño sea el valor de la selectividad, más grande será el equipo requerido para una separación dada. Lo ideal es que el compuesto más grande de una alimentación de dos componentes no se adsorba, convirtiéndose en un acarreador inerte, lo que da una muy buena selectividad. (4)

### **Regeneración**

La regeneración es esencial para todas las unidades de adsorción cíclicas, para que el adsorbente pueda operar en ciclos con un desempeño uniforme. Esto implica que el compuesto que se va a adsorber lo debe hacer de forma relativamente débil, por medio de adsorción física. (4)

La regeneración se puede conseguir por un cambio de temperatura (swing térmico), o de presión (swing de presión), por un desplazamiento químico, por elución o por extracción supercrítica. A veces, se utiliza una combinación de estas técnicas. El desplazamiento consiste en introducir un regenerante que adsorba más fuertemente que el adsorbato que ya está presente. La elución consiste en disolver el material adsorbido con un solvente que no se adsorbe. Los métodos

químicos requieren una separación adicional para recuperar el regenerante, lo cual puede ser costoso. (4)

La regenerabilidad de un adsorbente determina la fracción de la capacidad que se puede recuperar durante la regeneración, así como el tiempo y energía requeridos para la regeneración. Generalmente, una pequeña caída en la capacidad ocurre durante los primeros ciclos; seguida por un decaimiento gradual que determina la vida útil del adsorbente. (4)

### **Velocidad de reacción**

La cinética de transferencia de masa nos indica la resistencia que hay en la transferencia de masa intraparticular. Es importante debido a que controla el ciclo de tiempo en un proceso de adsorción con lecho fijo. (4)

Se desea una velocidad de reacción rápida, pero si ésto no se logra, se puede agregar adsorbente al producto al final del proceso, o se puede aumentar el tiempo del ciclo. Estas opciones aumentan la cantidad de material adsorbente requerido, lo cual aumenta los costos del sistema. Esto nos indica que una difusión lenta del adsorbato es una desventaja en el proceso. (4)

### **Compatibilidad, Costo**

La compatibilidad cubre varios modelos posibles de ataque químico y físico que reducen la vida útil del adsorbente. Las partículas del adsorbente deben ser inertes a los componentes en la alimentación y a los de la corriente regeneradora. Las condiciones de operación, como la velocidad, temperatura, presión y vibración del equipo, no deben causar desintegración de las partículas adsorbentes. (4)

El costo del material adsorbente varía mucho con el tiempo y con los proveedores. Aún para adsorbentes estándares, los precios pueden variar tanto como de \$0.50 a \$50 por libra. (4)

Para evaluar la capacidad, selectividad, regenerabilidad, cinética, compatibilidad y costo para un adsorbente dado, se pueden tomar cuatro acercamientos:

1. Contactar a los vendedores.
2. Buscar información que incluya el adsorbente.
3. El ingeniero puede recopilar la información en su empresa, si tiene las facilidades requeridas.
4. Se puede contratar a un laboratorio independiente para que recopile la información. (4)

## **D. DISEÑO DE SISTEMAS DE ADSORCIÓN**

El diseño de un sistema de adsorción debe tomar en cuenta una gran variedad de factores. Son muy importantes los relacionados con la selección del adsorbente y con el equilibrio de adsorción, así como el calor de la reacción y la dinámica del comportamiento del lecho. (4)

### **Equilibrio**

Los límites en la capacidad, selectividad y regenerabilidad de un proceso de adsorción están muchas veces determinados por el equilibrio del sistema. La capacidad del adsorbente es principalmente función de la concentración y la temperatura, y muchas veces se cuantifica por medio de isothermas. Una isoterma es una gráfica que muestra la carga en el adsorbente como una función de la concentración de adsorbato en la alimentación, a una temperatura dada. La selectividad es una función del equilibrio de un sistema multicomponente. Este equilibrio se puede expresar en términos de distintas relaciones y variables. Para regenerabilidad, la relación de equilibrio que interesa depende del método que se vaya a utilizar para la regeneración. (4)

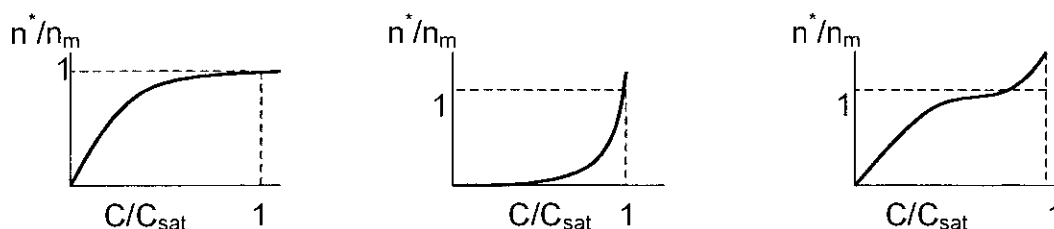
El calor de adsorción provee una medida de cuánto puede subir la temperatura debido a una adsorción bajo condiciones adiabáticas. También da una idea de la cantidad de energía que se requiere para una regeneración con una fase gaseosa o con vapor. (4)

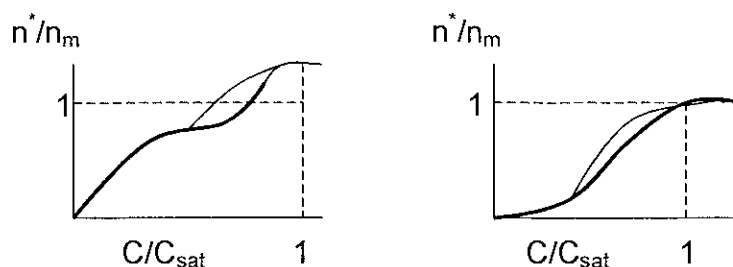
### Isotermas

Como la capacidad o carga determina el costo capital de una unidad de adsorción, el desarrollo de buenas isotermas para expresar la capacidad como una función de la composición de la alimentación es de los trabajos más importantes durante el diseño de un proceso de adsorción. Los comportamientos de los sistemas no se conocen, por lo cual es necesario tener datos experimentales para poder realizar el diseño. (4)

Los datos pueden ser determinados volumétrica, gravimétrica o cromatográficamente. El método volumétrico, que es el más flexible, de bajo costo y de buena precisión, utiliza un recipiente que contiene adsorbente en el cual se miden los cambios en la concentración de la fase fluida. La última concentración determina la cantidad de material que se adsorbió, por medio de un balance de masa. El método gravimétrico se utiliza para adsorción con un medio gaseoso; obteniendo datos exactos y fáciles de interpretar. Su principal desventaja es que se necesita equipo sofisticado y se sigue una metodología que consume mucho tiempo. En el método de cromatografía, el adsorbente se coloca en una columna cromatográfica y por medio de este análisis, se logra obtener los datos. (4)

Los datos obtenidos se grafican y casi siempre se aproximan a alguna de las siguientes figuras:





Donde,  $n^*$  = carga de adsorbente  
 $n_m$  = carga máxima de adsorbente  
 $C$  = concentración en la fase fluida  
 $C_{sat}$  = concentración de saturación (4)

La primera gráfica es cóncava hacia abajo y se conoce como una isoterma favorable; mientras la segunda, que es cóncava hacia arriba se conoce como una isoterma no-favorable. Las otras tres gráficas tienen regiones cóncavas hacia arriba y hacia abajo; mientras las últimas dos presentan histéresis que puede afectar la cinética y la regenerabilidad del sistema. La histéresis ocurre cuando la desorción ocurre a lo largo de una isoterma distinta a la de adsorción; generalmente como resultado de que el llenado de los poros se realiza de forma distinta al vaciado. (4)

Después de graficar los datos, se debe seleccionar una ecuación que se adecue a ellos. Hay muchas opciones, dependiendo del grado de complejidad, desde empíricas hasta muy teóricas. En muchos casos, es mejor utilizar ecuaciones sencillas, ya que las más elaboradas requieren datos de muchas mediciones. (4)

### Dinámica de adsorción

Hay tres aspectos del fenómeno de transporte en un lecho de adsorción a los cuales se les debe prestar especial atención al seleccionar el adsorbente. Estos son la difusión entre partículas, la transferencia de masa y la caída de presión en el lecho empacado. (4)

Durante una operación de adsorción, el grado de difusión entre partículas depende en todo momento del tamaño de las partículas individuales, el tiempo transcurrido y la difusividad efectiva del sistema. Una adsorción efectiva, rápida, se favorece por una difusividad grande, por un diámetro de partícula pequeño o por ambos. Sin embargo, muchas veces la caída de presión es más importante para seleccionar el tamaño de las partículas. (4)

La mejor medición del grado de transferencia de masa se hace con el coeficiente de transferencia de masa fluido-partícula,  $k$ . Valores altos de  $k$  implican una buena transferencia de masa. El valor de  $k$  depende principalmente de las propiedades del fluido (densidad, viscosidad y difusividad) y de la velocidad superficial, así como de un parámetro del adsorbente, el diámetro de las partículas. (4)

La mayor parte de adsorbedores operan con una caída de presión relativamente pequeña. Se utilizan partículas grandes de adsorbente siempre que se pueda para mantener la caída de presión baja. Otro factor que también contribuye a tener bajas caídas de presión es una baja velocidad del fluido, que se escoge para permitir equilibrio del fluido con el adsorbente. Esta baja velocidad del fluido hace que se utilicen lechos empacados cortos y de diámetro grande, en lugar de lechos largos y delgados. (4)

### III. JUSTIFICACIÓN

Dentro de la industria de velas aromáticas, se obtiene una gran cantidad de mezcla de parafina, con color y fragancia, que no se utiliza y se tiene almacenado. El principal motivo por el cual no se puede utilizar, es la presencia de colorantes y fragancias, que limitan el uso que se le puede dar. Basándose en esto, se desea establecer un método de adsorción para obtener una mezcla de parafina que se pueda reprocesar dentro de la empresa.

Con este estudio se está ayudando tanto a la empresa como al medio ambiente del país. Se ayuda a la empresa al darles una alternativa para minimizar los costos fijos, en especial el costo de inventario, reciclando materia prima que tienen almacenada. Se contribuye con el medio ambiente del país reduciendo los desperdicios característicos del proceso de producción de las velas aromáticas, como lo son las mezclas de parafina con colorantes y fragancia que se almacenan sin aprovecharse.

## IV. OBJETIVOS

### A. GENERALES

- Establecer un método de eliminación de color y fragancia de una mezcla de parafina.
- Determinar las condiciones del proceso que dan un mejor grado de remoción para este proceso.

### B. ESPECÍFICOS

- Eliminar color y fragancia por el método de adsorción.
- Encontrar qué tipo de material adsorbente elimina una mayor cantidad de colorantes y fragancia.
- Crear una escala para la evaluación de la concentración de color y fragancia en una mezcla de parafina.
- Encontrar hasta qué grado es posible eliminar el color y la fragancia de una mezcla de parafina.
- Determinar el efecto de la temperatura de la mezcla en el proceso de adsorción.
- Ayudar a la economía de la empresa reutilizando recursos que en un principio se consideran inutilizables.

## V. PROBLEMA A RESOLVER

Con el desarrollo de este trabajo, se encontrará una alternativa viable para el uso de la mezcla de parafina que se obtiene como desecho del proceso productivo de la elaboración de velas aromáticas.

La principal razón por la cual no se puede volver a utilizar la mezcla de parafina es la presencia de colorantes y fragancia, los cuales limitan el uso de este material. Si se elimina la fragancia y el color de esta mezcla, se transforma en una materia prima que serviría para fabricar cualquier vela.

El método de adsorción que se está considerando para purificar la parafina, tiene variables que se van a estudiar para encontrar las condiciones más adecuadas de operación. Estas variables son:

- Material adsorbente
- Temperatura de trabajo
- Tiempo de residencia

Después de realizar varias pruebas, utilizar escalas de concentración de color y fragancia determinadas experimentalmente, se establecerá cuál material adsorbente es el que remueve la mayor cantidad de colorantes y fragancia. También se sabrá la temperatura más adecuada de trabajo, y el tiempo de residencia que es necesario para lograr una buena separación.

Con los datos obtenidos, se diseñará un equipo de adsorción que se pueda utilizar en la empresa para tratar las mezclas de parafina que de otra forma serían desechadas. Se establecerán las dimensiones del equipo, los materiales de construcción, y el tiempo de vida útil del material adsorbente.

## VI. METODOLOGÍA

Este estudio se realizará de la siguiente forma:

### 1. Determinación del material

Se va a trabajar con cuatro distintos tipos de carbón activado; los cuales son:

- Suchar
- SX Plus
- SX 2
- S1 HF

Estos materiales tienen distintas características, que dependen básicamente del material del cual procede. Se trabajará bajo las mismas condiciones; para establecer el material más apropiado para la separación que se va a realizar, para llevar a cabo el procedimiento detallado a continuación:

- Tomar una muestra representativa del material de reproceso de parafina y pesar 1kg de muestra.
- Colocar el material en un molde de metal, resistente al calor, y calentar la mezcla de parafina hasta que se funda. Se debe tener cuidado de no recalentar la mezcla en el proceso de fundición para evitar la oxidación de alguno de los componentes.
- Cuando la mezcla esté fundida, sacar una muestra del material y dejarlo enfriar. La muestra fría se coloca en el colorímetro Hunter y se ingresa como el estado inicial de la mezcla.
- Se mide la temperatura de la mezcla, que se desea se encuentre a 80°C, y se agrega el material adsorbente.
- Se debe pesar el material adsorbente que se está utilizando, y se repetirá el procedimiento para 1g, 2g 3g y 4g de material adsorbente.
- En el momento de agregar el material adsorbente a la parafina, se empieza a tomar el tiempo. Se dará un tiempo de residencia de 120 min,

con agitación constante, y se tomarán muestras de la mezcla cada 30 minutos, para ver si hay cambios visibles.

- Las muestras tomadas se enfrían y luego se introducen al colorímetro, para poder ver las variaciones de forma más exacta.
- Este procedimiento se realiza con los cuatro materiales adsorbentes seleccionados del mercado.

Con la información recopilada de los cambios de color, se hará una escala del color, en la cual se tendrá un máximo de remoción, parafina blanca como resultado, y un mínimo que sería que la mezcla terminara y el proceso quedaría con el mismo color que entró.

## **2. Determinación de la temperatura de trabajo**

Después de seleccionar el material con el cual se logra la mejor separación, se debe establecer la temperatura de trabajo. Para establecer este parámetro, se toma en cuenta que la mezcla es sólida a temperaturas por debajo de los 60°C, y que no se debe calentar a más de 120°C o por largos períodos de tiempo debido a que el material se oxida. Basándose en esto, se seguirá el siguiente procedimiento:

- Pesar 500g de mezcla de parafina y 1g del material adsorbente.
- Se funde la mezcla, se lleva a la temperatura establecida y se agrega el material adsorbente.
- Se toman muestras cada 30 minutos durante 120 minutos y luego con la ayuda del colorímetro se establece el comportamiento.
- Se repetirá el procedimiento descrito anteriormente para temperaturas de trabajo de 80, 90, 105 y 120°C.

### **3. Determinación del tiempo de residencia**

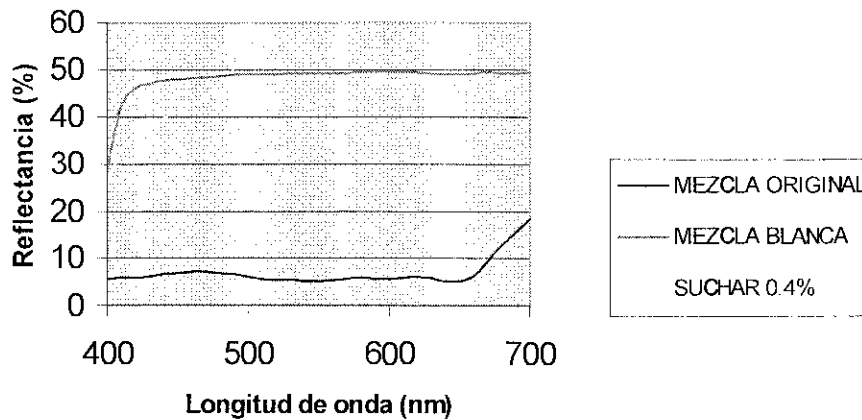
Teniendo establecida la temperatura más adecuada de trabajo, se debe conocer el tiempo de residencia apropiado. Se considera que cuando no se observen cambios significativos durante cierto período de tiempo, ya no se puede lograr una mejor eliminación a las condiciones de trabajo, por lo cual se debe terminar el proceso.

### **4. Diseño del equipo**

Con los datos recolectados experimentalmente, se procederá a realizar los cálculos necesarios para dimensionar un equipo de adsorción adecuado para tratar los desechos del proceso de las velas aromáticas. Se establecerán las dimensiones del equipo, la forma de operación, los materiales de construcción y la forma como se reutilizará el material adsorbente.

## VII. RESULTADOS

**Gráfica #1:** Escala de color para la mezcla original, la parafina blanca, y la mezcla de parafina después de ser tratada con carbón activado



Basándose en las pruebas realizadas, el material a utilizar es el carbón activado marca Suchar, de origen vegetal; a una concentración de 0.4%. El tiempo de residencia, a una temperatura de trabajo de 120°C, es de 2 horas. Con esta información, se obtuvo un equipo con las siguientes dimensiones.

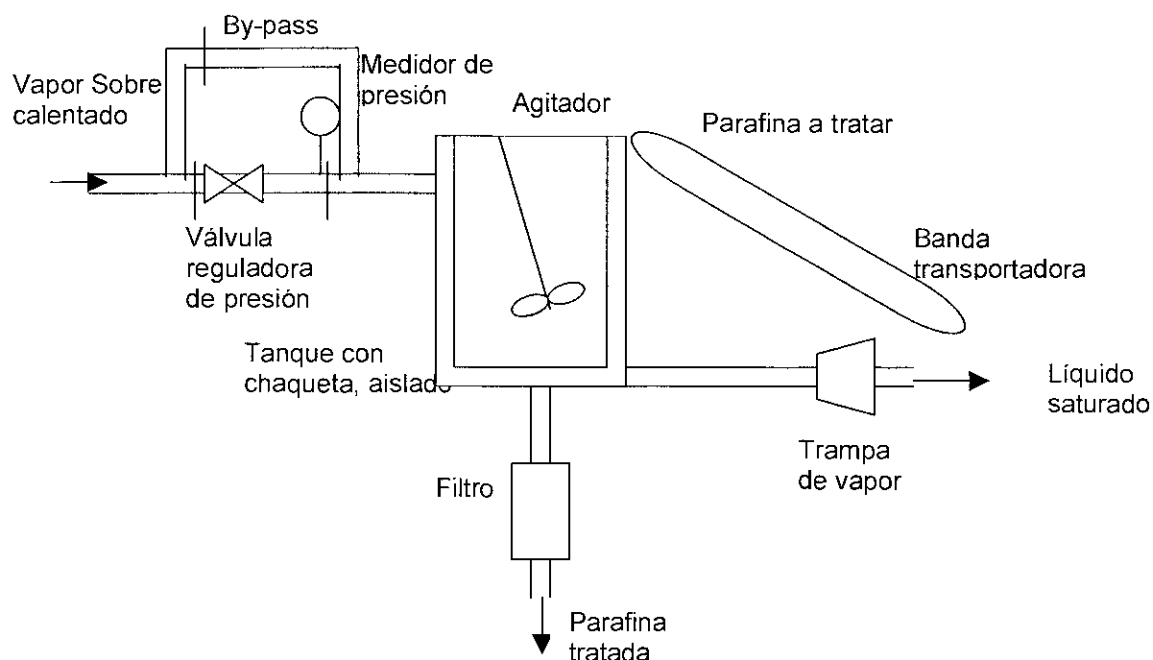
**Tabla #2:** Dimensiones del tanque de acero inoxidable 316

Diámetro interno del tanque	1 m
Espesor de la pared del tanque	3/4"
Altura interna del tanque	1.5 m
Volumen del tanque	1.1781 m <sup>3</sup>
Volumen de la chaqueta	0.3052 m <sup>3</sup>
Espesor de la capa de aislamiento de fibra de vidrio	0.1 m

**Tabla #3:** Dimensiones del agitador con rodete tipo marino

Diámetro del rodete	0.25 m
Separación del fondo del tanque	0.375 m
Inclinación respecto al eje vertical	30°
Velocidad de rotación	350 rpm
Tasa de reducción del motor	1:5

**Figura #1:** Esquema del sistema a utilizar



**Tabla #4:** Datos de requerimientos de energía para el proceso de adsorción para un lote de 600kg de parafina

Calor requerido para el proceso	267563.3 kJ
Vapor necesario por lote (600kg parafina)	115.5 kg vapor

## VIII. DISCUSIÓN

### **Determinación del material:**

En la gráfica #2(Ver Anexos), se tiene la longitud de onda (en nm) vrs. la reflectancia de la muestra. Para obtener esta gráfica, se ingresó como estándar la mezcla original, y las muestras finales de los distintos materiales. Se puede observar que el carbón activado Suchar es el que logra remover la mayor cantidad de colorantes, dando como resultado una mezcla bastante clara.

Respecto de la remoción de fragancia, se pudo notar que los carbones eliminan cierta cantidad del olor, pero dejan un aroma suave en la parafina. Esto no representa un mayor problema, debido a que si se le agrega otra fragancia a la mezcla, no es perceptible diferencia alguna en el aroma por la presencia de un poco de la fragancia original de la mezcla.

Basándose en ésto, se decidió que la mejor opción, tanto para la remoción de color como de fragancia, es el carbón activado Suchar.

Después de establecer el material, se necesitaba saber la concentración a utilizar de carbón activado para lograr una buena remoción. Se sabe que mientras mayor sea la cantidad de carbón, mejor será la eliminación de color y fragancia; aunque se dificulta la separación de la parafina y el costo es muy elevado, por el proceso de filtración que se requeriría. Por lo tanto, se deseaba encontrar una cantidad apropiada para estos propósitos. Se probaron las siguientes concentraciones (porcentaje peso/peso): 0.1%, 0.2%, 0.3% y 0.4% de carbón activado Suchar

A concentraciones más elevadas, es muy difícil separar el carbón de la mezcla; y el proceso de filtración se vuelve muy complicado y costoso. Se encontró que la concentración óptima de trabajo es de 0.4% Carbón activado Suchar.

No se utilizaron concentraciones mayores debido a que, como se puede observar en la gráfica #3(Ver Anexos), la mezcla obtenida tiene un color muy

similar a la mezcla de parafina blanca pura que se utiliza como base para la elaboración de las velas. Aumentar la concentración reduciría el tiempo de residencia, pero dificulta mucho la separación.

#### **Determinación de la Temperatura de Trabajo:**

Al trabajar con la mezcla carbón-parafina, se presentó una dificultad en el proceso de separación de estos dos compuestos; debido a que el carbón activado utilizado viene en forma de polvo, y queda suspendido en la parafina. Por este motivo, se tuvo que filtrar la mezcla, con papel filtro con poros de 6 micras, para lograr una buena separación. Al trabajar a temperaturas por debajo de 80°C, no se lograba separar la mezcla, debido a que la parafina se solidificaba antes de pasar por el papel filtro. Por este motivo, se hicieron pruebas a temperaturas más elevadas, llegando a obtener a 120°C una buena y fácil filtración. La temperatura elevada ayuda al proceso de adsorción, ya que el carbón activado aumenta su actividad con la temperatura, lo que reduce el tiempo de residencia. Esto nos ayuda, ya que al reducir el tiempo de residencia a un mínimo, se reduce la posibilidad de oxidación del material.

#### **Determinación del Tiempo de Residencia:**

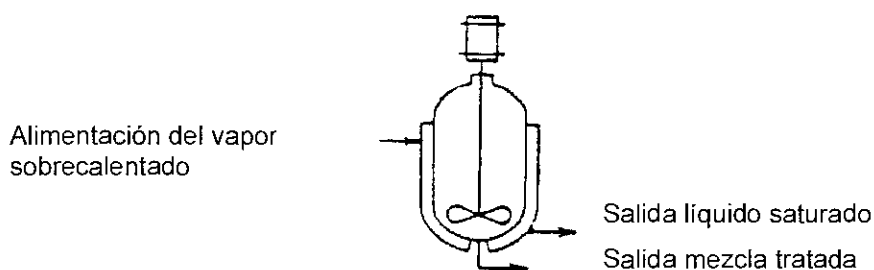
Después de establecer las variables anteriores, se estimó el tiempo necesario para obtener una buena remoción de color y fragancia. Se tomaron muestras cada 30 minutos, debido a que en períodos menores de tiempo, los cambios no eran muy notorios. Se llegó a establecer que después de 2 horas, no se logra remover mayor cantidad de colorantes; y sólo se iba a empezar a oxidar la mezcla de parafina. Se debe tomar en cuenta que no todos los lotes a tratar van a tener el mismo color inicial; y esto afecta directamente el tiempo de residencia. Si el color de la mezcla es más claro que el de la muestra trabajada, el tiempo de residencia puede disminuir; mientras que si es el más oscuro, el tiempo necesario puede ser mayor. Por este motivo, antes de sacar la mezcla de parafina del tanque, se debe tomar una muestra, para verificar si el color es

aceptable o si es necesario dar un poco más de tiempo de contacto antes de pasar la mezcla al filtro.

## Diseño del equipo:

### Tanque:

Utilizará un tanque de acero inoxidable 316, con chaqueta de vapor, cuyas dimensiones se presentan en la sección de Resultados, tabla #3. Se decidió utilizar acero inoxidable debido a que la parafina es un material orgánico que se oxida fácilmente en la presencia de otros metales. Las dimensiones del tanque nos permiten que al agregar 600kg de parafina, quede lleno aproximadamente 2/3 del volumen total; lo cual es recomendado para obtener una buena mezcla. El aislamiento con fibra de vidrio reduce las pérdidas de calor hacia los alrededores. Un dibujo esquemático del tanque a utilizar se presenta a continuación.



(11)

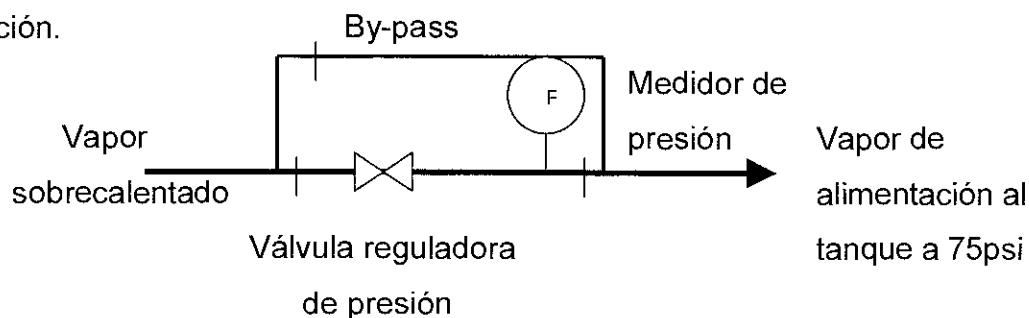
### Tubería de alimentación de vapor al tanque:

Utilizará una tubería de hierro negro, de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro; que se aislará con fibra de vidrio de 1" de espesor, para evitar que haya pérdidas de calor a través de la tubería. Se utiliza este tamaño de tubería ya que es la adecuada para el flujo de vapor requerido, y soporta bien la presión de trabajo.

### Sistema de regulación de la presión del vapor de la alimentación:

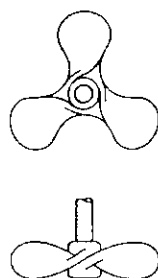
Para asegurarse que el vapor que entra en el tanque tenga una presión de 75 psi, se utilizará un sistema que incluye una válvula reguladora de presión, un

medidor de presión y un by-pass. Para medir la presión se utilizará un manómetro de cola de coche; y la válvula reguladora de presión será análoga, con una escala de 10 a 100 psi. Este sistema es necesario para tener un buen funcionamiento del proceso, ya que asegura que el suministro de energía sea el esperado, a un valor constante. Un esquema de este sistema se encuentra a continuación.



#### **Agitador:**

Se utilizará un agitador con rodete tipo marino (ver figura), para asegurar una buena mezcla, y lograr suspender el carbón y minimizar las áreas muertas.

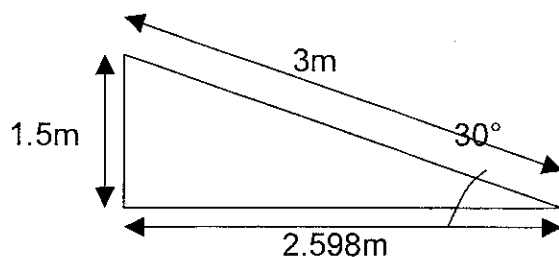


(11)

Para este fin, se inclinó el agitador, que se sujetará a la pared del tanque de forma que se pueda quitar fácilmente en caso que sea necesario darle mantenimiento o cambiarlo. Tanto el eje como el rodete del agitador serán de acero inoxidable para reducir el riesgo de oxidación de la mezcla por la presencia de otro metal. El agitador tiene un motor eléctrico de 1/2 hp; y opera con electricidad, corriente alterna de 220V.

### Banda transportadora:

Para alimentar la parafina sólida al tanque, utilizará una banda transportadora, de plástico (polietileno). La banda será de eslabones de 1", con una longitud de 6.314m, y un ancho de 20"; con rodos de 0.1m de diámetro, y se moverá a una velocidad de 1m/min (0.0167m/s). Con esta inclinación y a esta velocidad, no se presentan dificultades con el material (no se resbala ni se llega a caer). Ver figura a continuación con las dimensiones de la banda.



Para mover la banda, se utilizará un motor de 1/2 hp; que opera con electricidad, corriente alterna de 220V.

### Tubería de salida del vapor/condensado:

A la salida de la chaqueta del tanque, en la parte inferior, se coloca otra tubería de hierro negro, de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro, aislada con fibra de vidrio de 1" de espesor; que evita pérdidas de calor; y también accidentes de quemaduras que podrían darse si no se aísla esta parte del equipo. El flujo de líquido que se va a tener puede ser transportado por una tubería de este diámetro.

### Trampa de vapor:

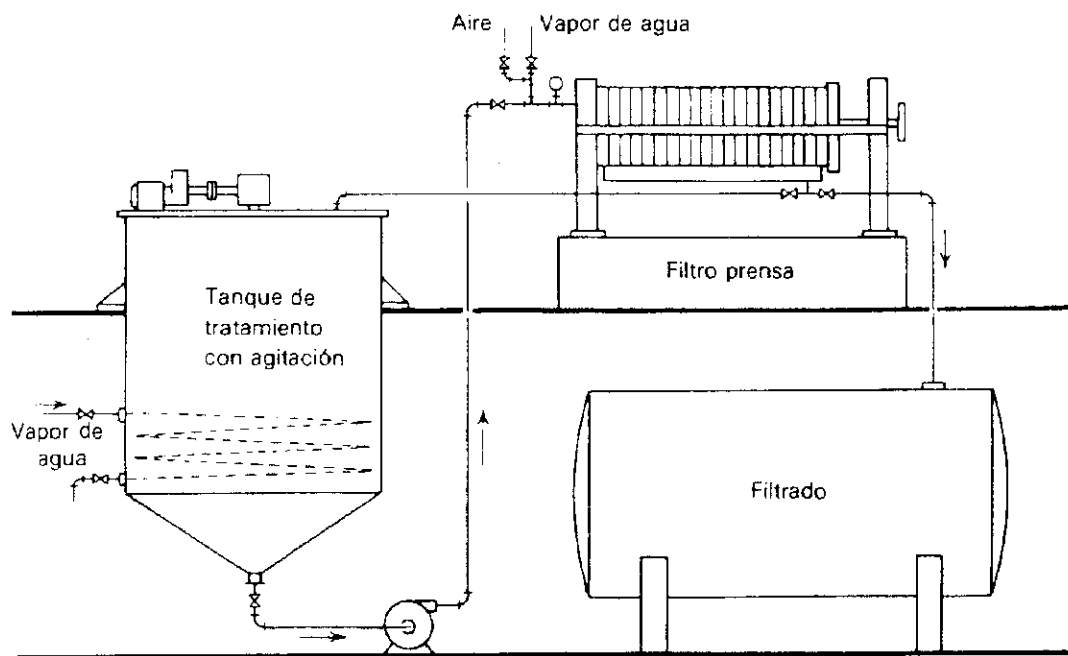
La trampa de vapor se encuentra en la tubería de salida de la chaqueta del tanque, y asegura que todo el vapor que sale del tanque lo haga en forma líquida. Esto permite que la transferencia de calor sea máxima, ya que se aprovecha todo el calor latente del vapor. Se utilizará una trampa de vapor de cubeta invertida, ya que es la más económica que se encuentra en el mercado para esta función, y su

desempeño, para este proceso, es tan bueno como el de las trampas de vapor más costosas.

### Filtro:

A la salida del tanque, se coloca un filtro prensa, para separar la parafina del carbón activado. Con este tipo de filtros, se puede trabajar a  $120^{\circ}\text{C}$  sin tener mayores dificultades. Se utilizará un filtro que tenga marcos de metal cubiertos con tela. Se utilizará una bomba centrífuga de una sola etapa con una caída de presión de hasta  $10\text{atm}$ , con un motor de  $5\text{ hp}$ , que opere con corriente alterna de  $440\text{V}$ . Se operará el filtro de forma discontinua, y se para cuando ya no salga más parafina del filtro o aumente drásticamente la presión. Esto indica que es necesario limpiar el filtro, removiendo la torta de carbón que se ha acumulado en las placas.

El filtro que se va a utilizar es horizontal, y se presenta un esquema a continuación. En esta figura se puede observar cómo la mezcla de parafina que sale del tanque, pasa por la bomba centrífuga para ser filtrada, y también las entradas y salidas del vapor de agua y aire que se utilizarán para lavar el filtro.



(8)

Con este proceso, se logra reutilizar la parafina que se consideraba un desecho, y se obtiene una mezcla de parafina que se puede utilizar para hacer velas de cualquier color y fragancia. Como desecho del proceso se obtiene la torta del filtro, que contiene principalmente carbón activado, con un poco de parafina. Este material se puede volver a utilizar, pero no es muy recomendable, ya que su funcionamiento no es satisfactorio, y por ser el resultado de un proceso de filtración, puede tener otros contaminantes, como tierra. También hay que mencionar que la torta quedaría como una piedra, y sería necesario molerla para volver a tener el carbón en forma granular, quedando con un área superficial mucho menor, lo cual reduce drásticamente su capacidad de adsorción.

Se calculó la cantidad de energía, en forma de calor, necesaria para llevar a cabo el proceso de adsorción; y con esta información se estimó la cantidad de vapor requerida. Basándose en la cantidad de vapor necesaria, se estableció que la caldera con la cual se cuenta tiene la capacidad para utilizarse en este proceso. Al calcular la transferencia de calor a través de la pared del metal, se está tomando en cuenta la cantidad de energía requerida para el proceso, y como todo el sistema, tuberías y tanque, se encuentran aislados con fibra de vidrio, las pérdidas de calor al medio ambiente se pueden despreciar.

## IX. CONCLUSIONES

Después de realizar este trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La mejor opción de material adsorbente para la remoción de color y fragancia de una mezcla de parafina es el carbón activado Suchar.
2. La concentración más adecuada de trabajo es de 0.4% de carbón activado Suchar, ya que remueve la mayor parte del color y fragancia, y se puede remover por medio de un proceso de filtración sencillo.
3. La temperatura de trabajo del proceso es de 120°C, la cual aumenta la activación del carbón, reduce el tiempo de residencia y evita la oxidación de la mezcla de parafina; permitiendo un proceso de filtración sencillo.
4. El tiempo de residencia estimado experimentalmente fue de 2 horas, pero puede variar dependiendo del color inicial de la mezcla.
5. Se va a utilizar un tanque de acero inoxidable 316, enchaquetado, cuyo medio de calentamiento será vapor sobrecalentado proveniente de una caldera.
6. Se trabajarán lotes de 600kg de mezcla de parafina, cuyo volumen será 2/3 del volumen total del tanque.
7. El agitador del tanque estará inclinado 30°, y tendrá un rodete de tipo marino de tres aspas, para asegurar una buena suspensión del carbón activado, lo que proporciona un buen contacto entre la parafina y el carbón, dando más posibilidades de adsorción.
8. La banda transportadora es un método rápido, económico y efectivo para alimentar la parafina sólida al tanque.
9. En la tubería de salida de vapor del tanque se colocó una trampa de vapor para aprovechar al máximo la energía del vapor, al utilizar una del tipo de cubeta invertida, que es funcional y económica.

10. Para separar la mezcla de parafina tratada del carbón, se utiliza un filtro prensa, que funciona bien a las condiciones de trabajo (temperatura de 120°C y caída de presión de hasta 10atm) y logra una buena separación; con una bomba centrífuga de una etapa con un motor de 5hp.
11. El carbón activado que quede en la torta del filtro no se volverá a utilizar debido a los problemas que lleva el proceso de volverlo a trabajar, y a su reducción en su capacidad de adsorción.
12. Para evitar pérdidas de calor al medio ambiente, se aislará todo el sistema con fibra de vidrio.

## X. RECOMENDACIONES

Después de realizar el trabajo, se tienen las siguientes recomendaciones:

1. Se debe realizar una prueba con 600kg de parafina para verificar las condiciones de proceso que se determinaron experimentalmente.
2. En cada lote que se trate debe ser analizado su color después de cada 30 minutos para asegurarse que la remoción de color llegue a ser la adecuada.
3. Se debe buscar la forma más apropiada de reutilizar el carbón activado que queda en la torta de filtración; cómo molerlo para volverlo a utilizar o venderlo a otra empresa que lo pueda utilizar.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Bland, W., y Davidson, R. 1967. **Petroleum Processing Handbook**. McGraw-Hill Book Company. Estados Unidos.
- (2) Hairston, D. 1995. **Activated Carbon gets Revved Up**. *Chemical Engineering*. 11: 75-78.
- (3) Kirk, R., et. al. 1961. **Enciclopedia de Tecnología Química**. Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana. México. Tomo 1. Pp471.
- (4) Knaebel, K. 1995. **For Your Next Separation, Consider Adsorption**. *Chemical Engineering*. 11: 92-102.
- (5) Nicol, G. 1995. **El libro de las velas**. Lorenz Books. Inglaterra.
- (6) McCabe, W., et. al. 1991. **Operaciones Básicas de Ingeniería Química**. McGraw-Hill Interamericana. 4ta. Edición. México.
- (7) Perry, R. y Green, D. 1984. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. McGraw-Hill Book Company. 6ta. Edición. Estados Unidos.
- (8) Treybal, R. 1988. **Operaciones de Transferencia de Masa**. McGraw-Hill Interamericana. 2da. Edición. México.
- (9) Smith, J., et. al. 1997. **Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química**. McGraw-Hill Interamericana. 5ta. Edición. México.
- (10) Petrofin Corporation. 1998. **Handy Wax Facts**. Petroleum Wax Converter. New York.
- (11) Ulrich, G. 1993. **Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química**. McGraw-Hill Interamericana. México.
- (12) Notas clase de Manejo de Sólidos por Ing. Oscar Gil. Universidad del Valle de Guatemala. 1998.
- (13) Notas clase de Control e Instrumentación de Procesos por Ing. Oscar Gil. Universidad del Valle de Guatemala. 1999.

## XII. ANEXOS

## DATOS

Tabla #5: Datos teóricos de la parafina:

Calor específico de la parafina ( $C_p$ )	0.5 BTU/lb°F (2.093 kJ/kg-K) (10)
Calor latente de fusión de la parafina ( $\lambda$ )	97 BTU/lb°F (225.622 kJ/kg) (10)
Densidad de la parafina sólida ( $\sigma$ )	0.8750 g/ml *
Densidad de la parafina líquida ( $\sigma$ )	0.7875 g/ml *

\*Determinados experimentalmente con la mezcla de parafina utilizada

Tabla #6: Datos teóricos del carbón activado:

Calor específico del carbón activado ( $C_p$ )	0.314 cal/g°C (1.3138 kJ/kg-K)
--	--------------------------------

(7)

Tabla #7: Datos teóricos del vapor utilizado como medio de calentamiento en el proceso

Temperatura inicial del vapor sobrecalentado	260 °C
Presión inicial del vapor sobrecalentado	75 psi (517.107 kPa)
Energía interna inicial del vapor sobrecalentado	2739.39 kJ/kg
Volumen específico inicial del vapor sobrecalentado	467.84 cm <sup>3</sup> /g
Temperatura final del líquido saturado	100 °C
Presión final del líquido saturado	14.7 psi (101.325 kPa)
Energía interna final del líquido saturado	418.959 kJ/kg

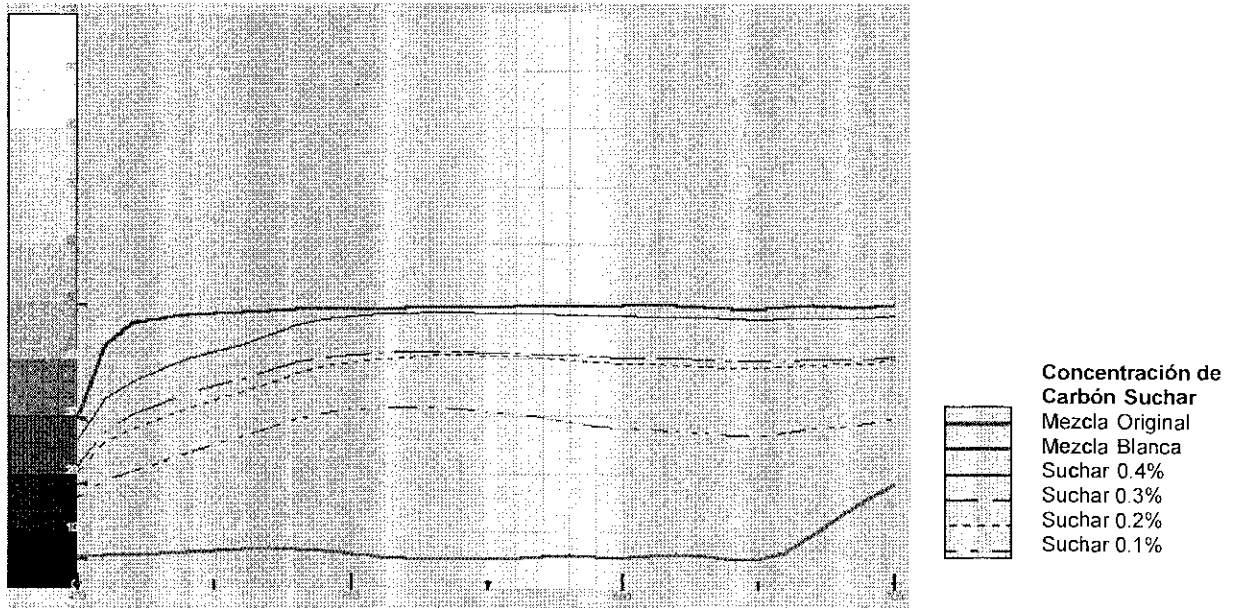
(9)

Gráfica #2: Datos de color obtenidos con diferentes carbones activados



Longitud de Onda (nm) vrs. Reflectancia de la muestra

**Gráfica #3:** Datos de color obtenidos con carbón activado Suchar a distintas concentraciones

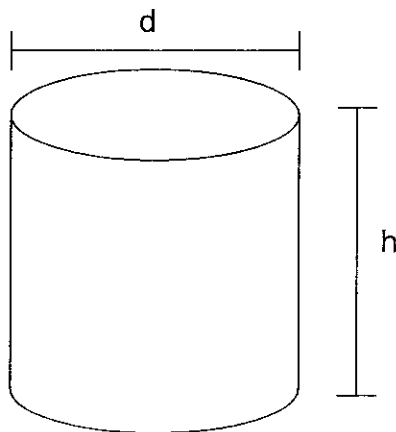


Longitud de Onda (nm) vrs. Reflectancia de la muestra

## CÁLCULOS

### Volumen del Tanque:

Se va a utilizar un tanque cilíndrico, con las siguientes dimensiones:



Donde:

d = diámetro del tanque (m)

h = altura del tanque (m)

Se va a utilizar un tanque que tenga las siguientes dimensiones:

d = 1.0 m

h = 1.5 m

La ecuación utilizada para calcular el volumen de un cilindro es:

$$V = \pi r^2 h \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

V = volumen de un cilindro (m<sup>3</sup>)

$\pi$  = 3.1416 (adimensional)

r = radio del cilindro (m)

Sustituyendo valores en la Ecuación 1 se obtiene:

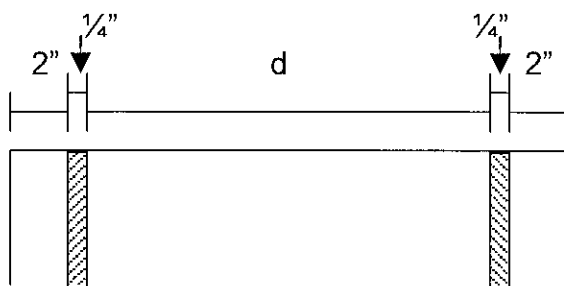
$$V = (3.1416) \cdot (0.5\text{m})^2 \cdot (1.5\text{m})$$

$$V = 1.1781 \text{ m}^3$$

El volumen del tanque es de  $1.1781 \text{ m}^3$ .

### Volumen de la chaqueta del tanque:

El tanque utilizado tiene una pared de  $\frac{1}{4}$ " de espesor; y 2" de radio de espacio vacío, en el cual circulará el vapor (ver figura).



Con estos datos, se obtiene:

- Volumen externo del tanque:

Utilizando la Ecuación 1, con  $r = 0.5\text{m} + 0.00635\text{m} = 0.50635\text{m}$

y con  $h = 1.5\text{m} + 0.00635\text{m} = 1.50635\text{m}$

$$V = (3.1416) \cdot (0.50635\text{m})^2 \cdot (1.50635\text{m}) = 1.2133 \text{ m}^3$$

- Volumen del cilindro interno de la chaqueta:

Utilizando la Ecuación 1, con  $r = 0.50635\text{m} + 0.0508\text{m} = 0.55715\text{m}$

y con  $h = 1.50635\text{m} + 0.0508\text{m} = 1.55715\text{m}$

$$V = (3.1416) \cdot (0.55715\text{m})^2 \cdot (1.55715\text{m}) = 1.5185 \text{ m}^3$$

- Volumen vacío de la chaqueta:

Este volumen se calcula con los datos anteriores, de la siguiente forma:

Volumen vacío chaqueta = Volumen cilindro interno chaqueta –

Volumen externo tanque

Ecuación 2

Utilizando la ecuación 2 se obtiene:

$$\text{Volumen vacío chaqueta} = 1.5185 \text{ m}^3 - 1.2133 \text{ m}^3 = 0.3052 \text{ m}^3$$

### Cantidad de carbón activado por lote:

Se va a trabajar en lotes de 600kg de mezcla de parafina; por lo cual se le debe agregar la siguiente cantidad de carbón activado:

$$600\text{kg parafina} * \frac{0.4\text{kg carbón}}{100\text{kg parafina}} = 2.4 \text{ kg carbón activado por lote}$$

### Calor requerido para el proceso:

- Para aumentar la temperatura de la parafina sólida de 15°C a 60°C:

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$q = mC_p\Delta T \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:  $q$  = calor (kJ)

$m$  = masa (kg)

$C_p$  = calor específico a presión constante (kJ/kg-K)

$\Delta T$  = cambio de temperatura (K)

Sustituyendo valores en la ecuación 3 para la parafina en esta etapa del proceso:

$$q = (600\text{kg}) * (2.093\text{kJ/kg-K}) * (60-15\text{K}) = 56511 \text{ kJ}$$

- Para pasar la parafina sólida a líquida:

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$q = m\lambda \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:  $q$  = calor (kJ)

$m$  = masa (kg)

$\lambda$  = calor latente de fusión de la parafina (kJ/kg)

Sustituyendo valores en la Ecuación 4 para la parafina en esta etapa del proceso se obtiene:

$$q = (600\text{kg}) * (225.622\text{kJ/kg}) = 135373.2 \text{ kJ}$$

- Para aumentar la temperatura de la parafina líquida de 60°C a 120°C:  
Se sustituyen en la Ecuación 3 los datos de la parafina en esta etapa del proceso, obteniendo:

$$q = (600\text{kg}) \cdot (2.093\text{kJ/kg-K}) \cdot (120-60\text{K}) = 75348 \text{ kJ}$$

- Para aumentar la temperatura del carbón activado de 15°C a 120°C:  
Se sustituyen en la Ecuación 3 los datos para el carbón activado y se obtiene:

$$q = (2.4\text{kg}) \cdot (1.3138\text{kJ/kg}) \cdot (120-15\text{K}) = 331.0776 \text{ kJ}$$

- Calor total requerido para el proceso:  
Se utiliza la siguiente ecuación:

$$q_T = \sum q_i \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$q_T$  = calor total del proceso (kJ)

$q_i$  = calor de una etapa del proceso (kJ)

Para las etapas anteriores, al sustituir los datos en la ecuación 5, se obtiene:

$$q_T = 56511\text{kJ} + 135373.2\text{kJ} + 75348\text{kJ} + 331.0776\text{kJ} = 267563.2776 \text{ kJ}$$

### Calor disponible del vapor:

El vapor a utilizar proviene de una caldera; y entra al tanque a una temperatura de 260°C y a una presión de 75 psi; saliendo del tanque como líquido saturado a una temperatura de 100°C y 14.7 psi. El vapor sufre estos cambios en un proceso a volumen constante; por lo cual se utiliza la ecuación 4.

Como el volumen de la chaqueta es de 0.3052m<sup>3</sup>, y se conoce el volumen específico del vapor que está ingresando al tanque, se puede conocer la masa de vapor alimentado, de la siguiente forma:

$$0.3052\text{m}^3 \cdot \frac{1 \times 10^6 \text{cm}^3}{1\text{m}^3} \cdot \frac{1\text{g}}{467.84\text{cm}^3} \cdot \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 0.6524 \text{ kg de vapor}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 4 se obtiene:

$$q = (0.6524\text{kg}) \cdot (418.959 - 2739.39 \text{ kJ/kg}) = 1513.756 \text{ kJ}$$

Como se necesitan 267563.2776 kJ para el proceso, se necesita llenar la chaqueta con vapor un total de  $(267563.2776/1513.756 = 176.75)$  177 veces; lo cual da la siguiente cantidad de vapor:

$$0.6524 \text{ kg vapor} \cdot 177 = 115.47 \text{ kg de vapor}$$

### **Transferencia de calor del vapor a la parafina, a través de la pared del tanque de acero inoxidable 316:**

Se tiene la siguiente ecuación:

$$q = UA\Delta T \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:  $q$  = calor (kJ)

$U$  = coeficiente global de transferencia de calor ( $\text{kJ/m}^2 \text{ K}$ )

$\Delta T$  = diferencia de temperatura (K)

El coeficiente global de transferencia de calor se puede definir, basándose en el área interior o exterior del cilindro, con las siguientes ecuaciones:

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x_w}{k_m} \frac{D_i}{D_L} + \frac{1}{h_o} \frac{D_i}{D_o}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{D_o}{D_i} + \frac{x_w}{k_m} \frac{D_o}{D_L} + \frac{1}{h_o}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:  $U_i$  = coeficiente global de transferencia de calor basada en el área interna ( $\text{kJ/m}^2 \text{ K}$ )

$U_o$  = coeficiente global de transferencia de calor basada en el área externa ( $\text{kJ/m}^2 \text{ K}$ )

$x_w$  = espesor de la pared del tanque (m)

$D_i$  = diámetro interno del tanque (m)

$D_o$  = diámetro externo del tanque (m)

$D_L$  = diámetro logarítmico medio (m)

$k_m$  = conductividad del metal de la pared del tanque (16.269 W/m°C para el acero inoxidable 316)

$h_i$  = coeficiente de transferencia de calor para la parte interna del tanque (kJ/m<sup>2</sup> K)

$h_o$  = coeficiente de transferencia de calor para la parte externa del tanque (kJ/m<sup>2</sup> K)

Para calcular el diámetro logarítmico medio se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_L = \frac{D_o - D_i}{\ln(D_o/D_i)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Con los datos del tanque, sustituyendo valores en la Ecuación 9 se obtiene:

$$D_L = (1.0127 - 1)/\ln(1.0127/1) = 1.0063 \text{ m}$$

Para calcular el área externa del tanque, que está en contacto con el vapor, se utiliza la fórmula del área superficial de un cilindro, con un lado abierto:

$$A = \pi r^2 + 2\pi r h \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:  $A$  = área superficial del cilindro (m<sup>2</sup>)

$\pi$  = 3.1416 (adimensional)

$r$  = radio del cilindro (m)

$h$  = altura del cilindro (m)

Sustituyendo los datos del tanque en la Ecuación 10 se obtiene:

$$A = (3.1416)*(0.50635)^2 + 2*(3.1416)*(0.50635)*(1.50635) = 5.598 \text{ m}^2$$

Para calcular el área interna del tanque, que está en contacto con la parafina, se utiliza la ecuación 10; y al sustituir los datos del tanque, se obtiene:

$$A = (3.1416)*(0.5)^2 + 2*(3.1416)*(0.5)*(1.5) = 5.498 \text{ m}^2$$

Para encontrar el valor de  $h_o$ , por tratarse de transferencia de calor de un gas sobrecalentado, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$q = h_o A_o \Delta T \quad \text{Ecuación 11}$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$267563.2776 \text{kJ}/3600 \text{s} = h_o(5.598 \text{m}^2) \cdot (260-100) \text{K}$$

$$h_o = 82.98 \text{ J/m}^2 \text{sK}$$

Con los valores para  $h_i$ , al sustituir en la Ecuación 11, se obtienen los siguientes datos:

$$267563.2776 \text{kJ}/3600 \text{s} = h_i(5.498 \text{m}^2) \cdot (120-15) \text{K}$$

$$h_i = 128.745 \text{ J/m}^2 \text{sK}$$

Con toda la información anterior, basándose en el área externa del tanque, se sustituyen valores en la ecuación 8 y 6 para obtener:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1.0127}{(128.7) \cdot 1} + \frac{(0.00635) \cdot (1.0127)}{(16.269) \cdot (1.0063)} + \frac{1}{82.98}} = 49.24 \text{ J/ m}^2 \text{sK}$$

$$q = (49.24) \cdot (5.598) \cdot (160) = 44100.82 \text{ J/s}$$

Con toda la información anterior, basándose en el área interna del tanque, se sustituyen valores en la ecuación 7 y 6 para obtener:

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{(128.7)} + \frac{(0.00635) \cdot (1)}{(16.269) \cdot (1.0063)} + \frac{1}{(82.98) \cdot (1.0127)}} = 49.86 \text{ J/ m}^2 \text{sK}$$

$$q = (49.86) \cdot (5.498) \cdot (105) = 28785.16 \text{ J/s}$$

### Balance de Calor:

El flujo de calor de la chaqueta hacia el interior del tanque es igual al flujo de calor del interior del tanque hacia fuera, más el calor requerido para calentar la pared del metal. Con esta información, se puede encontrar el calor requerido para calentar el metal:

$$q_m = q_e - q_i \quad \text{Ecuación \#12}$$

Donde:  $q_m$  = calor para calentar el metal

$q_e$  = calor hacia el interior del tanque

$q_i$  = calor hacia el exterior del tanque

Al sustituir valores en la ecuación #12, se obtiene:

$$Q_m = 44100.82 \text{ J/s} - 28785.16 \text{ J/s} = 15315.66 \text{ J/s}$$

### Dimensionamiento del motor de la banda:

Para encontrar el tamaño apropiado de motor necesario para el transportador de banda, se utilizó la siguiente ecuación:

$$P = 0.35 + (C/100) * (0.4 + 0.00345L) + 2C * H / 1000 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde: P = Potencia del motor (hp)

C = Capacidad del transportador (ton/hr)

L = Distancia entre los centros de los rodos (pie)

H = Altura de la banda (ft) (12)

Como se conocen los valores para estas variables, al sustituir valores en la ecuación 13, se obtiene:

$$P = 0.35 + ((7.94 \text{ ton/hr}) / 1000) * (0.4 + 0.00345 * 9.84) + 2 * (7.94) * (4.92) / 1000$$

$$P = 0.432 \text{ hp}$$

Basándose en esta información, se estima que un motor de ½ hp es el adecuado para la banda transportadora que alimenta la parafina.

### Dimensionamiento del motor de la bomba centrífuga del filtro prensa:

Para encontrar el tamaño adecuado de motor para la bomba centrífuga de una etapa del filtro prensa, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = F * \Delta P / (1714 \eta) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde: P = potencia (hp)

F = flujo (gpm)

$\Delta P$  = caída de presión (psi)

$\eta$  = eficiencia (13)

Para calcular el flujo de la bomba, se estima un tiempo de descarga de 6 minutos para los 600kg de mezcla de parafina, lo que da un flujo de 33.545 gpm. Con una eficiencia del 60%, al sustituir valores en la ecuación 14, se obtiene:

$$P = (33.545) * (147) / (1714 * 0.6) = 4.79 \text{ hp}$$

Con esta información, se estima que un motor de 5hp es el adecuado para trasladar la mezcla de parafina del tanque al filtro prensa.

