

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DESODORIZACIÓN DE ACEITE DE MAÍZ

Tutores Académicos:

Prof. Rafael Martín.

Prof. Carlos Morales.

**Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero Químico
Por la Br. Jenny Alejandra Bengochea Acosta**

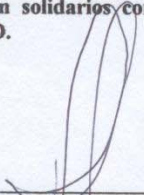
Caracas, Junio de 2004

Caracas, Junio de 2004

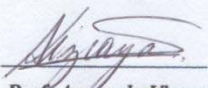
Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Jenny Alejandra Bengochea Acosta, titulado:

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DESODORIZACIÓN DE ACEITE DE
MAÍZ**

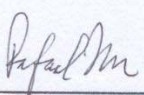
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. José Sorrentino
Jurado



Prof. Armando Vizcaya
Jurado



Prof. Rafael Martín
Tutor Académico

Prof. Carlos Morales
Tutor Académico

DEDICATORIA

He logrado alcanzar una de mis principales metas que me he propuesto en mi vida, es por ello que dedico este Trabajo Especial de Grado a aquellas personas que estuvieron conmigo en cada instante de mi vida.

Se lo dedico a mi madre por haberme dado la vida, por darme siempre el ejemplo de fortaleza, perseverancia, paciencia, constancia, lucha y amor hacia las cosas que ha hecho en su vida y por darme los mejores consejos, para ti mami es este trabajo que es el primer paso que doy gracias a ti, te amo mucho.

A mi manito que mas que mi hermano ha sido mi padre, dándome el mejor ejemplo de amor, por cuidarme siempre y por sentirse tan grandote por mis logros, manito infla más porque ya llegue al primer piso ahora voy hacia la cima del cielo y con tu apoyo lo lograré, te quiero muchoooooooooote.

A mis abuelitos que aunque no están conmigo ahora siempre me brindaron su apoyo, abuelita Evelia gracias por tu sonrisa y tu cariño de siempre, abuelo Eustoquio se que ahora el orgullo es mucho más grande y que juntos desde el cielo están llenos de felicidad, esto es para ustedes y estarán siempre en mi corazón, los adoro.

A mis tías y a mi tío, Francys, Virginia, Milagros, Evelyn, Mercedes y Juan que han estado siempre pendientes de mi y de mis logros, esto también es su logro por el amor y cariño que siempre me han dado, tíos los quiero mucho.

A mis primos y primitos ustedes también han puesto su granito de arena en este proyecto, por nuestros juegos de infancia y por la inocencia que algunos conservan todavía.

A todos los amo y los adoro con todo mi corazón y gracias a ustedes he llegado hasta aquí por ustedes seguiré adelante.

Los quiero muuuuuuuuuuuuuuuchooo!!!

Jenny

AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso
A la ilustre Universidad
Central de Venezuela
A mis tutores Rafael
Martín y Carlos
Morales. Al profesor
Rafael Martín
A mis profesores
Wadou, Mary Luz, José
Moreno, José Francisco,
Armando Vizcaya,
Leandro Lezama,
Berenice Blanco,
Humberto Kum, Hinda
Elmans, Samir Marzuka,
Luis García.
A mis compañeros de
estudios y amigos
verdaderos María
Verónica, Gabriela,
Armando, Yan Carlos,
Lorenzo, Karen Lucia,
Juan José, Judeylis,
Ana, Adalis, Mercedes,
Adriana, Thais, Heidy,
Jonathan, Emmanuel,
Alejandro Sanz,
Marisela, Gianfranco,
Nury, Anulka. A Iraida.
A mis estudiantes de
Cinética y de
Transferencia de Masa
A mis amiguitas de
siempre Ana María y
Gertrudis.
A la señora Teresa, la
señora Gisela y a
Negrta

He aprendido...

He aprendido...
que no debes compararte a ti mismo con lo mejor que los otros
pueden hacer.

He aprendido...
que siempre debes despedirte de los seres queridos con palabras
amorosas, porque puede ser la última vez que los veas.

He aprendido...
que siempre puedo seguir adelante mucho después de que pensaba que
ya no podía.

He aprendido...
que somos responsables por lo que hacemos, no importa como nos
sentamos.

He aprendido...
que no importa qué calurosa e intensa sea una relación al principio,
la pasión disminuye y es mejor que haya algo que tome su lugar.

He aprendido...
que los héroes son personas que hacen lo que se debe hacer y
cuando es necesario hacerlo, independientemente de las consecuencias.

He aprendido...
que mi mejor amigo y yo podemos estar haciendo algo o haciendo
nada, y sin embargo la pasamos muy bien.

He aprendido...
que a veces cuando estoy enojado tengo el derecho de estar
enojado, pero no el derecho de ser cruel.

He aprendido...
que la verdadera amistad continua creciendo, incluso a pesar de
las distancias más grandes. Lo mismo se aplica al amor verdadero.

He aprendido...
que sólo porque alguien no te quiera de la forma que deseas, eso no
significa que esa persona no te quiera de la mejor forma de que es
capaz de quererte.

He aprendido...
que la madurez tiene mucho que ver con las clases de experiencias
que has tenido y con lo que has aprendido de ellas, y poco con
la cantidad de cumpleaños que has celebrado.

A todo el personal
administrativo del
Tecnológico Antonio
Ricaurte.
A las profesoras Belinda
Gómez y Virginia
Ramírez,
A mi otro hermano
mayor Nilo Guillen.
A mi tutor industrial
Luis Blanco.
Al personal de
Remavenca.
A la gerencia de calidad.
A Marbelis Bravo, Jesús
Camargo, Abrahán
Colmenares, Osmayer
Coronado, Rodolfo
García, Antonio
Capobianco, Pastor
García, Margarita
Borges, Francisco
Bolívar, Nelson Zerpa,
todos los mecánicos,
electricistas e
instrumentistas que me
prestaron su ayuda
cuando lo necesite.
Al Sr. Félix Romero.
A todos que de una
forma u otra
contribuyeron en el
desarrollo mi carrera y
que por omisión
involuntaria no los
nombre
Para todos MUCHAS
GRACIAS

He aprendido...
que nunca debes decirle a un niño que sus sueños son irrealizables
o desproporcionados. Pocas cosas son tan humillantes como
esa, y que tragedia sería si llegaran a creerlo.

He aprendido...
que independientemente de lo bueno que sea un amigo, habrá
momentos en que me hiera y deberé perdonarlo por eso.

He aprendido...
que no importa cuán roto este tu corazón, el mundo no se detendrá
para consolarte.

He aprendido...
que nuestros antecedentes y circunstancias pueden haber influenciado
lo que somos, pero somos responsables por lo que lleguemos a ser.

He aprendido...
que no tenemos que cambiar de amigos si llegamos a entender que
los amigos cambian.

He aprendido...
que no deberías esforzarte tanto para descubrir un secreto.
Podría cambiar tu vida para siempre.

He aprendido...
que dos personas pueden estar viendo la misma cosa y ver algo
totalmente diferente.

He aprendido...
que aun cuando pienses que ya no tienes nada más que dar, si un
amigo te pide ayuda, encontrarás la fuerza para hacerlo.

He aprendido...
que los títulos en una pared no te hacen un ser humano decente.

He aprendido...
que las personas que más te importan en la vida, son alejadas de
ti demasiado pronto.

He aprendido...
Que existen amigos verdaderos que siempre te prestan el apoyo que
necesitas,
aún cuando no te haga falta

Recuerda que...
La vida es un aprendizaje constante.

A todos y cada uno de ellos GRACIAS
Todos están aquí y en mi corazón....

Bengochea A. Jenny A.

***SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DESODORIZACIÓN DE
ACEITE DE MAÍZ***

Tutores Académicos: Prof. Rafael Martín y Prof. Carlos Morales

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Año 2004, 90 p.

Palabras Claves: Desodorización, aceite, simulación.

Resumen: El presente trabajo se realizó con la finalidad de hacer la simulación de la etapa de Desodorización del proceso de refinación de aceite de maíz, en un lenguaje de programación que permita al analista o supervisor de la Empresa Refinadora de Maíz Venezolana C.A., evaluar y estudiar las condiciones de operación que se requerirán para procesar un aceite de ciertas características y obtener el porcentaje de acidez establecido por la misma empresa. Para llegar a este objetivo primero se estableció la relación que tienen las variables del proceso (presión, temperatura y flujos máscicos) con los parámetros de calidad exigidos por las normas, específicamente con el porcentaje de acidez. Se realizó el balance de masa correspondiente a este parámetro y se obtuvo el modelo matemático que permitió realizar la simulación del proceso. El programa de la simulación fue codificado en el lenguaje Visual Basic 5.0, a manera de facilitar al usuario el uso del mismo. El programa además de determinar las condiciones de operación del proceso y determinar el porcentaje de acidez final, también permite evaluar la influencia que tienen las variables entre sí. Los resultados arrojados por el programa dan un porcentaje de desviación menor al 1 % cuando se determina la temperatura a la que se

debe desodorizar un aceite dada la presión absoluta del sistema y prácticamente cero cuando se realiza la simulación para determinar el porcentaje de acidez final bajo las condiciones de operación que especifique el usuario. Por lo dicho anteriormente, se puede decir, que la simulación de la Desodorización, es una herramienta útil para realizar un estudio y analizar que resultados se obtendrán al querer procesar un aceite con ciertas características antes de pasarlo por el proceso industrial, disminuyendo así costos de operación, de mantenimiento y de materia prima para el proceso de refinación de aceite de maíz. Con el programa también se evalúa que variable o variables conviene más manipular a la hora de que falle el suministro de vapor de arrastre para el proceso, tomando en cuenta que la calidad del aceite debe ser la misma, lo que aporta información útil al momento de tomar una decisión.

Índice General

<i>Índice De Tablas</i>	<i>iv</i>
<i>Índice De Figuras</i>	<i>v</i>
<i>Nomenclatura.....</i>	<i>vi</i>
<i>1. Introducción</i>	<i>1</i>
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2.2. OBJETIVOS.....	5
<i>3. Marco Teórico</i>	<i>6</i>
3.1. ACEITE DE MAÍZ COMESTIBLE.....	6
3.1.1. Descripción Del Proceso De Refinación De Aceite De Maíz	6
3.1.2. Descripción Del Proceso De Desodorización Industrial En La Planta Remavenca.....	11
3.2. GENERALIDADES DE LA DESODORIZACIÓN	16
3.2.1. Necesidad De Vapor.....	18
3.2.2. Influencia De Las Variables Del Proceso	24
3.2.3. Equipos De Desodorización	29
3.2.4. Pruebas De Control De Calidad	33
3.3. SIMULACIÓN DE PROCESOS QUÍMICOS EN COMPUTADORA.	39
<i>4. Metodología.....</i>	<i>42</i>
<i>5. Resultados Y Discusión De Resultados</i>	<i>49</i>
<i>6. Conclusiones</i>	<i>57</i>
<i>7. Recomendaciones.....</i>	<i>58</i>
<i>8. Bibliografía.....</i>	<i>59</i>
<i>9. Apéndices</i>	<i>60</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla N°1: Presiones De Vapor Del Ácido Palmítico</i>	<i>25</i>
<i>Tabla N°2 Requisitos De Calidad Del Aceite De Maíz.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla N° 3: Normas Covenin Revisadas</i>	<i>42</i>
<i>Tabla N° 4: Temperatura De Operación A Distintas Relaciones De Flujo V/L.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla N° 5: Validación Del Programa En Función De La Temperatura De Operación</i>	<i>52</i>
<i>Tabla N° 6: Porcentaje De Acidez Final.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla N° 7: Datos Del Proceso Industrial.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla N° 8: Características Del Vapor De Inyección Y Tamaño De La Placa De Orificio</i>	<i>61</i>
<i>Tabla N° 9: Relación De Diámetros</i>	<i>72</i>
<i>Tabla N° 10 Flujo De Vapor.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla N° 11 Flujo Molar Y Compasiones De Entrada Y Salida Del Proceso</i>	<i>73</i>
<i>Tabla N° 12 Composiciones De Las Etapas 1, 2 Y 3.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla N° 13: Presión De Cada Etapa.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla N° 14: Presión De Vapor De Cada Etapa</i>	<i>76</i>

Índice De Figuras

<i>FIGURA N°1: DIAGRAMA DE BLOQUE DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACEITE DE MAÍZ..</i>	<i>7</i>
<i>FIGURA N°2: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE DESODORIZACIÓN</i>	<i>12</i>
<i>FIGURA N°3: ESQUEMA DEL DESODORIZADOR INDUSTRIAL</i>	<i>15</i>
<i>FIGURA N°4: INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE VACÍO EN LA DESODORIZACIÓN DE ACEITE DE PALMA (BAILEY, 1967).....</i>	<i>27</i>
<i>FIGURA N° 5: INTERFAZ PARA EL CALCULO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN</i>	<i>45</i>
<i>FIGURA N° 6: INTERFAZ PARA EL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ACIDEZ.....</i>	<i>47</i>
<i>FIGURA N° 7: TEMPERATURA DE OPERACIÓN A DISTINTAS RELACIONES DE FLUJO</i>	<i>51</i>
<i>FIGURA N° 8: PORCENTAJE DE ACIDEZ FINAL</i>	<i>54</i>

NOMENCLATURA

A_b : Área de la burbuja (L^2)

Ac : Porcentaje de Acidez (adim)

E : eficiencia de vaporización (adim)

IP : Índice de Peróxido (meq/kg de O_2)

L' : Flujo másico de aceite (M/θ)

L_I : Flujo molar de aceite a la entrada del desodorizador continuo (N/θ)

L_S : Flujo molar de aceite a la salida del desodorizador continuo (N/θ)

M_{Aceite} : Masa de aceite (M)

NN_{NaOH} : Normalidad de NaOH gastado (eq/L^3)

N_T : Normalidad de Tiusulfato de Sodio gastado (eq/L^3)

O : Moles de aceite a desodorizar (N)

P_A : Presión parcial del componente volátil ($M/L \theta^2$)

P_A^O : Presión de vapor del componente volátil puro ($M/L \theta^2$)

PM_O : Peso molecular del aceite (M/N)

PM_W : Peso molecular del agua (M/N)

P_T : Presión total del sistema ($M/L \theta$)

S : Flujo molar de vapor a la entrada (N/θ)

S' : Flujo másico de vapor (M/θ)

T : Temperatura (T)

t : Tiempo de desodorización (θ)

t_c : Tiempo de contacto (θ)

V : Flujo molar de vapor a la salida (N/θ)

V_{NaOH} : Volumen de NaOH gastado (L^3)

V_T : Volumen de Tiusulfato de Sodio gastado (L^3)

W' : Flujo molar de vapor manejado en proceso discontinuo (N/θ)

W : Moles de vapor manejado en proceso discontinuo (N/θ)

w_A : Fracción másica (adim)

x_A : fracción molar del componente de interés en el líquido (adim)

y_A : Fracción molar del componente de interés en el vapor (adim)

γ_A : Coeficiente de Actividad (adim)

1. INTRODUCCIÓN

El aceite de maíz por sus características y propiedades de resistir condiciones adversas es muy bien aceptado por los consumidores. El proceso para la elaboración del aceite de maíz comienza desde la separación del germen del grano de maíz, debido al alto contenido graso que éste posee. El aceite resultante del proceso de extracción del germen, es un aceite crudo que contiene impurezas desagradables que son necesarias separar del mismo, a través de una refinación que permite que se llegue a un producto final limpio, de color tenue y de suave sabor listo para ser envasado.

El proceso de refinación se lleva a cabo en siete etapas sencillas de separación de sólidos y sustancias no deseables para el aceite de maíz refinado, las cuales están divididas en dos tipos de refinación: una química, en donde se llevan a cabo las etapas de **Clarificación, Desgomado, Neutralización y Desencerado**; y una refinación física, donde se sigue el procedimiento para las etapas de **Blanqueo, Winterización y Desodorización**.

En la empresa Refinadora de Maíz Venezolana C.A. (REMAVENCA, establecimiento Turmero) se realiza a pequeña escala (en el laboratorio) el proceso de refinación, basándose en el proceso industrial para obtener el aceite de maíz MAZEITE. Se cuenta con un procedimiento sencillo para cada etapa, sin embargo la última etapa del proceso, la desodorización, no se ha podido ejecutar debido a que las condiciones de presión y de necesidad de vapor de agua que se requieren para llevar a cabo el modelo a escala, son difíciles de conseguir en el laboratorio.

Ante esta situación se planteo diseñar un programa computarizado que permita simular y modelar la etapa de desodorización para completar así el proceso de refinación de aceite de maíz. Para poder programar la simulación se determinaron modelos matemáticos que determinan el comportamiento del proceso, los cuales fueron codificados en el lenguaje de programación Visual Basic para crear la interfase que permite al usuario utilizar el programa.

2.1. Planteamiento del problema

En muchas industrias de alimentos existen procesos de fabricación de productos de consumo masivo que son estudiados a pequeña escala, en donde se evalúan los resultados que se obtienen cuando se hacen cambios en alguna característica de la materia prima, en la adición o eliminación de algún ingrediente, o al cambiar alguna variable de operación bajo la cual es llevado el proceso industrial.

Tal es el caso de la empresa Refinadora de Maíz Venezolana C.A. (REMAVENCA, establecimiento Turmero) en donde, bajo la dirección del Departamento de Control de Procesos, se desarrolla, a escala de laboratorio, el proceso de refinación del aceite de maíz MAZEITE. Este proceso se divide en dos tipos de refinación, una química y una física. En la refinación química se desarrollan las etapas de clarificado, desgomado, neutralización y desencerrado, las cuales se modelan completamente en el laboratorio, más no es así en la refinación física ya que de las tres etapas que se llevan a cabo, (blanqueo, winterización y desodorización) la única etapa que no se modela es la desodorización, ya que no se cuentan con las herramientas necesarias que facilitan la ejecución del procedimiento de este proceso.

El proceso que se lleva a cabo en la desodorización es una destilación de arrastre con vapor de agua con alto vacío. En el laboratorio se ha tratado de trabajar con vapor de agua, pero no se cuenta con el vapor de las características necesarias para el proceso a pequeña escala, es por ello que se propuso usar otro sistema de arrastre, nitrógeno, el cual resulta un sistema ideal para trabajar debido a la inercia que presenta este gas, sin embargo se tiene que el proceso se hace costoso al tratar de usar este gas de arrastre. Otro inconveniente que se presenta es que el sistema de vacío con el que se cuenta en el laboratorio no proporciona la presión que se requiere para el

proceso (que está en el orden de 1 a 10 mmHg) y el sistema de vacío, que consta de una bomba, solo proporciona una presión de 120 mmHg.

Así como se plantean procesos a pequeña escala para hacer evaluación y estudios sobre los parámetros del proceso industrial, también se ha planteado llevar tales procesos a un lenguaje de programación que facilite aún más el estudio que se desee realizar, además de que se reducen los costos de manejo, mantenimiento y de materia prima.

Es por esto que se ha planteado realizar un programa que ejecute la simulación del proceso de Desodorización en el computador, para evaluar así los cambios que podría tener la materia prima (aceite crudo). Los cambios en la materia prima vienen dados, básicamente, por las diferentes proporciones de aceite crudo que entra al proceso, ya que este está constituido, en ocasiones, por una mezcla de dos tipos de aceite, uno que se produce en la planta de extracción de la empresa y otro proveniente de otras empresas procesadoras de aceite crudo de maíz. Lo que se persigue es estudiar diferentes proporciones de la mezcla de aceites, para determinar que variables del proceso (presión y temperatura) se deben cambiar y como afectan tales cambios a los parámetros de calidad; ya que en planta se debe cumplir con la especificación que se ha establecido la empresa internamente, que es obtener un aceite con bajo contenido en ácidos grasos libres (un porcentaje $\leq 0,05$ % de acidez oleica).

2.2. OBJETIVOS

General:

Simular y modelar la etapa de desodorización de aceite de maíz elaborado en REMAVENCA.

Específicos:

- ✓ Establecer la relación que existe entre las variables del proceso (presión, temperatura y necesidad del vapor) y los parámetros de calidad (específicamente con el porcentaje de acidez) que se obtienen como resultado de la desodorización.
- ✓ Determinar modelos matemáticos que establezcan el comportamiento del proceso de desodorización de aceite de maíz.
- ✓ Desarrollar un programa en Visual Basic para codificar los modelos matemáticos y facilitar al usuario el manejo de la simulación del proceso.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Aceite de maíz comestible

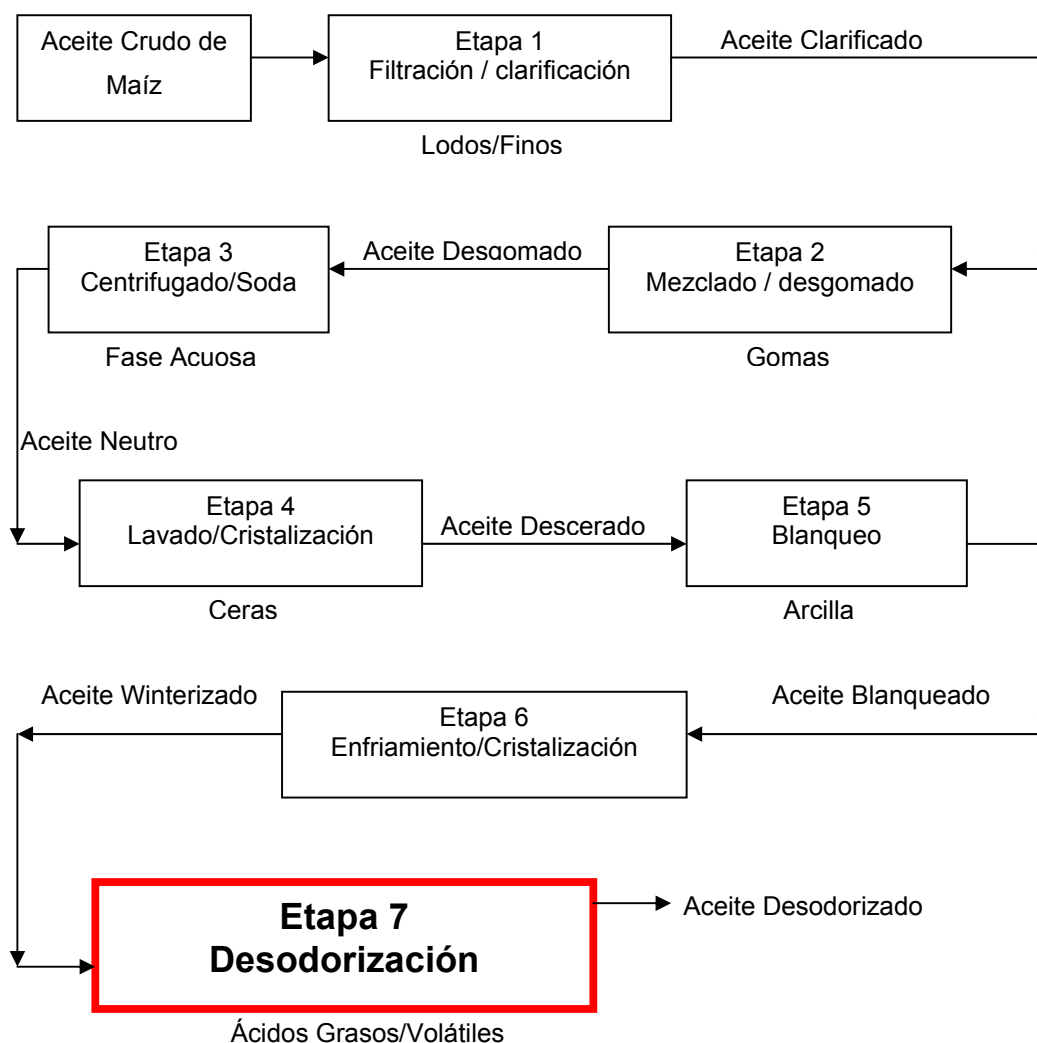
El aceite de maíz es un aceite que se utiliza para el consumo humano y es muy apreciado por los consumidores gracias a sus características organolépticas. Este tipo de aceite posee un excelente sabor, es una fuente concentrada de energía y de ácidos grasos esenciales. Es por ello que el proceso de obtención de este tipo de aceite debe hacerse bajo ciertas condiciones de operación que permitan obtener características deseables y establecidas por las normas de calidad, para que el producto sea colocado en el mercado de consumidores.

El aceite crudo que se procesa y se refina para obtener el aceite de maíz comercial se extrae del germen del grano de maíz debido al alto contenido graso que éste presenta. Esta extracción se realiza con hexano, ya que la grasa contenida en el germen es bastante soluble en este solvente. Terminada la extracción el hexano se separa del aceite y se reutiliza. Debido a la alta volatilidad de este solvente, en el aceite final no queda resto alguno del mismo. (Séller, 1996)

3.1.1. Descripción del proceso de Refinación de Aceite de Maíz

Una vez que el aceite crudo es separado del hexano, está apto para iniciar el proceso de refinación que consta de las siguientes etapas, las cuales se pueden observar en la siguiente figura:

Figura N°1: Diagrama de Bloque del Proceso de obtención de Aceite de Maíz



- ♣ Clarificación (Etapa 1): El objetivo de esta etapa es eliminar del aceite todas aquellas sustancias insolubles e indeseables que perjudiquen el estado del producto final. El aceite crudo es conducido por una bomba hacia unos filtros de seguridad para eliminar las impurezas de mayor tamaño que puedan afectar el proceso de

clarificación. Luego, el aceite es acondicionado hasta alcanzar una temperatura de 60°-65°C, a la cual pasa a la separadora/clarificadora, donde por centrifugación, se facilita la separación de los finos (partículas sólidas, conchas y arena) contenidos en el aceite crudo, teniéndose dos corrientes, una de aceite clarificado y otra de lodos, siendo estos últimos llevados nuevamente a la planta de extracción o utilizados como materia prima para alimentos concentrados en otras empresas.

♣ Desgomado (Etapa 2): Es el término con que se define el tratamiento destinado a remover ciertas impurezas como los fosfolípidos, fragmentos de proteínas, gomas y otras sustancias que son solubles en el aceite solamente en su forma anhidra, para ello el aceite clarificado es calentado por contacto directo con vapor, para elevar su temperatura a 65°-75°C. Una vez logrado esto, el aceite pasa a un mezclador y se adiciona agua (hasta 1% v/v en la mezcla), con la finalidad de hidratarlo y separar posteriormente las gomas bajo la forma de gotas de peso específico más alto que el del aceite. Aproximadamente de un 5 a 20% de los fosfolípidos son removidos del aceite en presencia del desgomado con agua (fosfolípidos hidratables).

Del mezclador se envía a un tanque de agitación lenta, con el tiempo de residencia necesario para insolubilizar la mayoría de las gomas y fosfátidos presentes, formándose flóculos que facilitan la separación en la centrífuga a la cual se envía la mezcla. De esta etapa de remoción se obtiene, el aceite desgomado y las gomas que posteriormente, por deshidratación son convertidas en lecitina de maíz comercial.

♣ Refinación Alcalina o Neutralización (Etapa 3): Este proceso envuelve el uso de álcalis fuertes (soda cáustica) con el propósito de hacerlo reaccionar con los ácidos grasos libres presentes en el aceite y formar sustancias jabonosas insolubles, para disminuir la alta acidez que presenta el aceite crudo que se esté tratando.

Para ello se añade de 12 al 14% p/p de hidróxido de sodio al aceite proveniente de la etapa anterior, reaccionando así con otras impurezas del aceite que conducen a la formación de dos fases: la fase orgánica que es el aceite neutro prácticamente libre de impurezas, y la fase acuosa, que contiene básicamente jabón, harina, y/o fosfolípidos no hidratables. Ambas fases se separan en centrífugas.

Luego el aceite neutro proveniente de la centrífuga se mezcla con agua suavizada caliente, en cantidades aproximadas del 10 al 20% en peso, esto con la finalidad de realizar un lavado que remueva la mayor parte del jabón residual del aceite neutro, el cual posteriormente se hace pasar por un secador al vacío para disminuir su humedad. El aceite neutro es enfriado y almacenado para los procesos restantes. En ocasiones esta etapa no se lleva a cabo debido a que la acidez que presenta el aceite crudo no es tan alta como para hacer este tratamiento químico.

♣ Descerado (Etapa 4): Esta operación es realizada con el fin de eliminar aquellos componentes con bajo punto de fusión, incluyendo ceras y glicéridos trisaturados presentes en el aceite de maíz en pequeñas cantidades (menos de 0,5%). Así se garantiza la claridad y brillo del aceite a temperatura ambiente e inclusive cuando está refrigerado.

Este proceso, también llamado invernación húmeda, consiste en un enfriamiento previo mediante intercambio indirecto con agua, disminuyendo la temperatura del mismo hasta 28°-30°C. Luego, el aceite pasa a través de un intercambiador donde por contacto indirecto con glicol, baja su temperatura entre 5°-10°C para lograr la cristalización de las ceras y estearinas presentes en el aceite para precipitarlas. Las ceras y los jabones son separados por centrifugación del aceite y el producto obtenido es un aceite húmedo. Éste pasa a través de un mezclador, donde se le añade agua para extraer los restos de jabón y ceras utilizando una centrífuga lavadora en frío.

Posteriormente, el aceite es conducido a través de intercambiadores donde por contacto directo con vapor, eleva su temperatura hasta 85°-90°C. El aceite es llevado a un mezclador donde se le añade agua caliente con la finalidad de extraer las últimas trazas de jabones y ceras que no fueron separadas anteriormente. El aceite descerado húmedo pasa luego a un secador de vacío, con el fin de eliminarle la humedad, como preparativo para la siguiente etapa. El aceite obtenido de este proceso se conoce con el nombre de aceite descerado seco.

♣ Blanqueo (Etapa 5): El aceite refinado hasta ahora es sometido a un proceso de blanqueo, el cual consiste en mezclar una arcilla absorbente con el aceite, con el propósito de reducir el color del mismo por remoción de pigmentos que se encuentran disueltos en forma de partículas coloidales dispersas. En el blanqueo, también se remueven impurezas como jabón, agentes catalíticos, componentes metálicos, trazas de compuestos oxidantes y otros contaminantes que puedan quedar como remanentes en el aceite. Este proceso se lleva a cabo a un vacío de 6,7 kPa de presión absoluta en un equipo continuo, usando de 0,5 a 15% de arcilla de blanqueo activada en un rango de 90° a 110°C durante 20-40 minutos.

♣ Winterización (Etapa 6): El aceite blanqueado pasa a través de intercambiadores donde por contacto indirecto con glicol disminuye su temperatura a 10°-20°C, luego es colocado en tanques de cristalización, con sistemas de enfriamiento con glicol, para facilitar la formación de cristales de estearinas que hayan liberado los procesos anteriores. Después de cierto tiempo, es llevado a través de un filtro prensa y almacenado en tanques para luego llevarlo a su última etapa de enfriamiento. El aceite de esta etapa se denomina aceite winterizado.

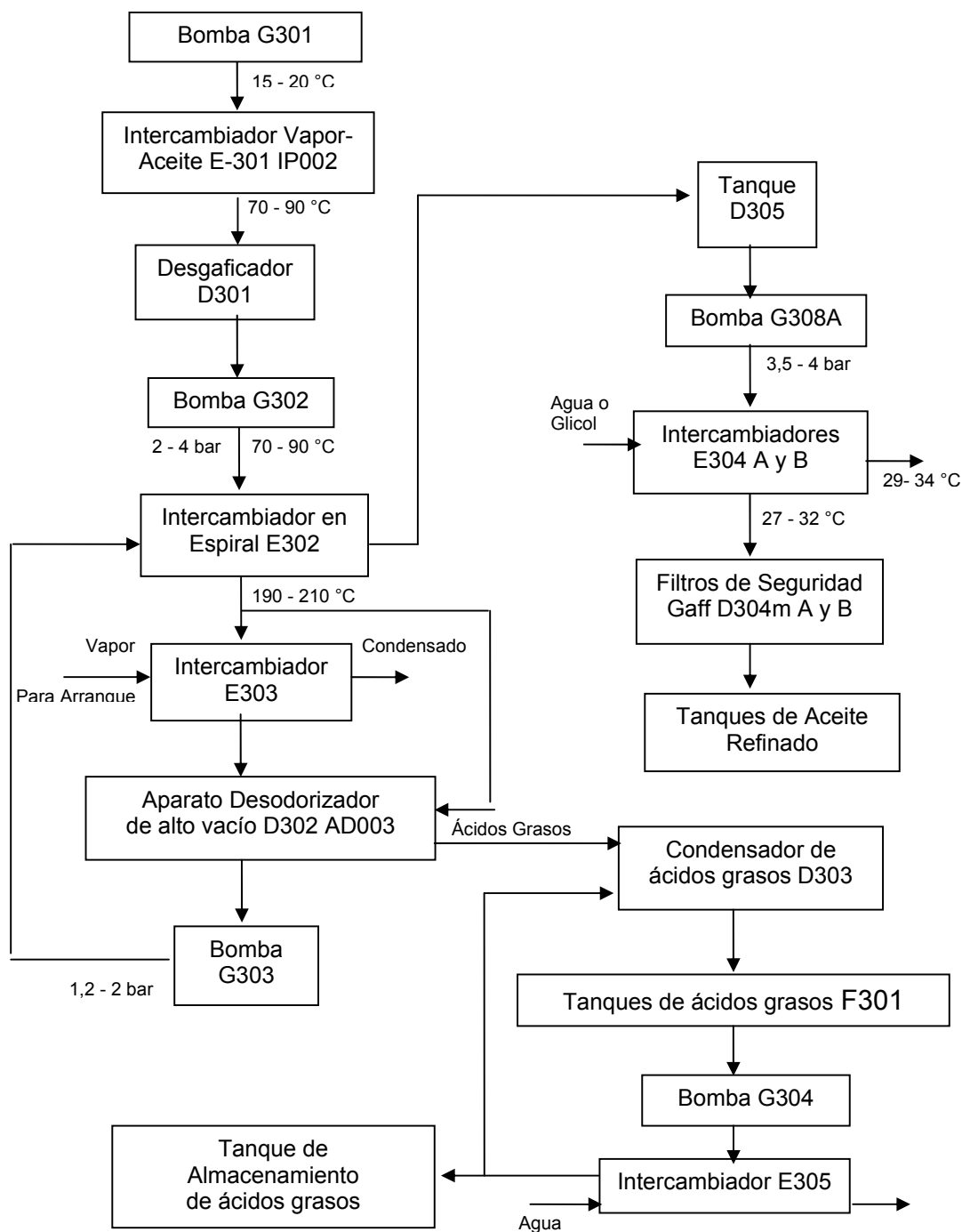
♣ Desodorización (Etapa 7): Es la última etapa del procesamiento del aceite. Consiste en someter al aceite a condiciones de alta temperatura (255°-265°C) y alto vacío (0,4-0,8 kPa), por la acción de vapor de agua, con el fin de arrastrar los componentes volátiles que le imparten color, olor y sabor al aceite, dados por ácidos grasos libres y otras sustancias como aldehídos, cetonas, alcoholes, hidrocarburos, esteroides y otra variedad de componentes provenientes de la degradación de peróxidos y pigmentos característicos del aceite. (Proceso REMAVENCA)

3.1.2. Descripción del proceso de Desodorización Industrial en la Planta REMAVENCA.

El proceso de desodorización de aceite comestible de maíz a nivel industrial, en la planta Refinadora de Maíz Venezolana C.A. (REMAVENCA), se muestra de manera ilustrativa en la figura N° 2, siendo ésta un diagrama de bloque simplificado en donde se puede observar lo que ocurre en el Desodorizador industrial.

De los tanques de almacenamiento de aceite post-winterizado sale la materia prima que es la alimentación al circuito de desodorización, a razón de entre 4000 y 6000 Kg/h y a una temperatura aproximada de 15°-25°C. Seguidamente, el aceite pasa por un intercambiador de flujo cruzado, donde eleva su temperatura a un rango de 70°-90°C por contacto indirecto con vapor a razón de 270 Kg/h y el cual se encuentra a 143°C. Una vez aumentada la temperatura, el aceite entra en la etapa de desgasificación, donde es conducido a un tambor de separación instantánea, sometido a una presión de prevacío que oscila entre 0,5 y 7,0 kPa, para eliminar la mayor cantidad de aire y compuestos oxigenados posibles del aceite. Del tambor salen dos corrientes, la del tope que va al sistema de condensadores barométricos y la del fondo

Figura N°2: Diagrama de bloques del Proceso de Desodorización



que pasa a través de una bomba que aumenta su presión a un intervalo de 200-400 kPa. Luego, el aceite pasa por medio de un intercambiador en espiral, donde por contacto indirecto con la salida del aceite ya desodorizado (con una temperatura de 250°-260°C), aumenta su temperatura a 190°-210°C.

Solo para efectos de arranque de la columna, el aceite pasa a través de un intercambiador de flujo cruzado, que por contacto indirecto con vapor, calienta el aceite a la temperatura necesaria para esta etapa, esto se hace debido a que para el momento de arranque no hay aceite desodorizado como producto saliendo de la columna.

Una vez que el aceite se encuentra acondicionado térmicamente, entra al desodorizador con alto vacío. Se llena la etapa I con el aceite y se inyecta vapor a dicha etapa con una presión de 1,3 bar y se espera que el aceite llegue a una temperatura de aproximadamente 260 °C. El aceite pasa a las siguientes etapas por rebose, a medida que se llenan se inyecta vapor directo a una presión de 1,7, 1,5 y 2 bar a las etapas II, III y IV respectivamente.

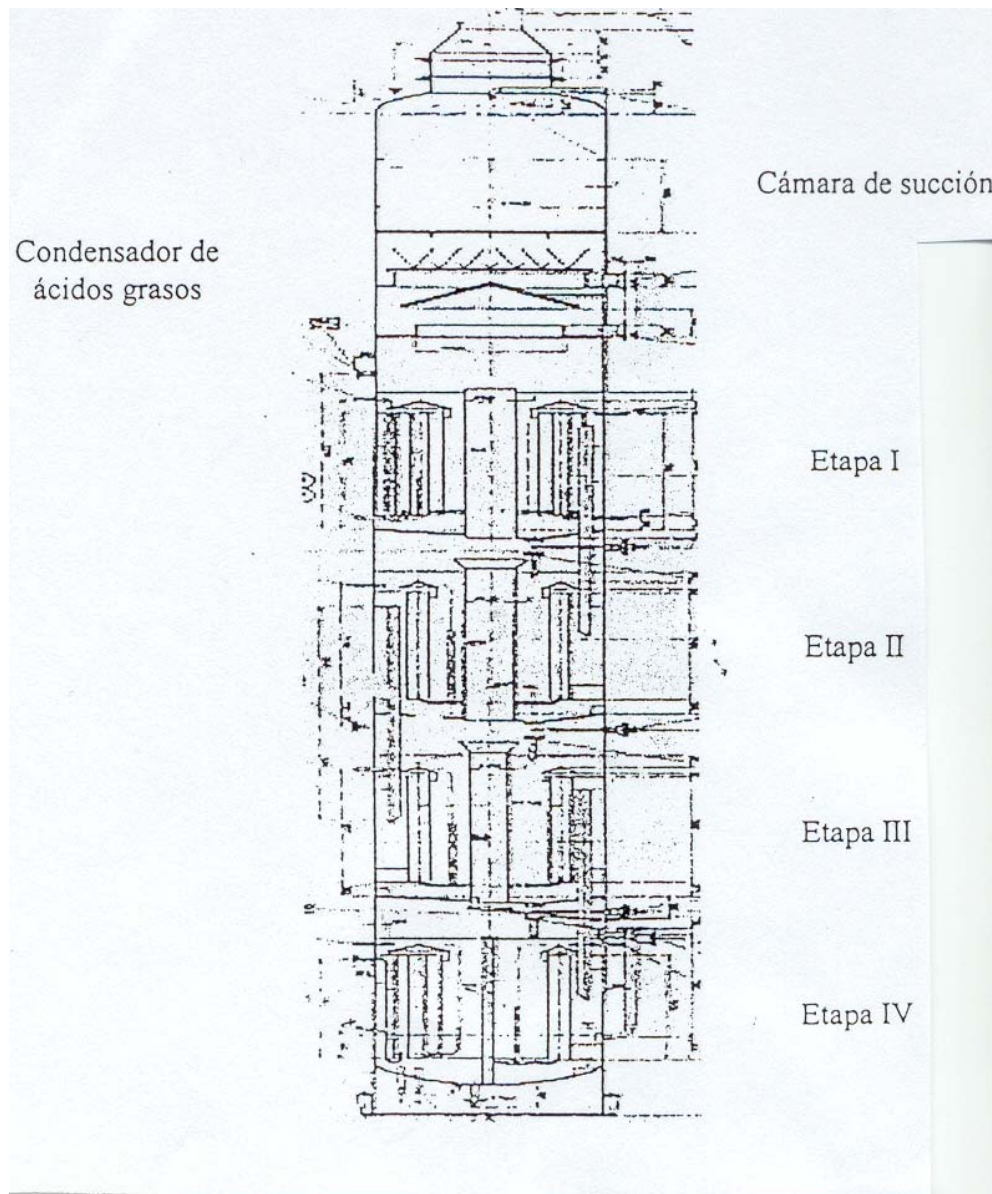
Este equipo tiene una altura aproximada de 16 m y 1,8 m de diámetro, hecho con acero suave con protección antioxidante y anticorrosiva. De acuerdo con su diseño, entra en la categoría de sistemas de desodorización semicontinuos en flujo cruzado de bandejas múltiples. Consta de 4 cámaras o etapas, numeradas en orden creciente de arriba hacia abajo, en las cuales ocurre el contacto entre el vapor de ascenso y el aceite en descenso. Este proceso se ve favorecido por el hecho de que cada cámara consta de un par de bombas mamuth de 1,6 m de altura, que acrecienta y hace más efectivo el contacto entre las fases. A su vez, cada etapa tiene una sección central hueca que permite el paso del vapor de arrastre de las etapas inferiores a las etapas superiores. Dicha sección aumenta su diámetro desde 0,1 m hasta 0,5 m de la

cámara inferior (etapa IV) hasta la cámara superior (etapa I). El vapor de arrastre se inyecta principalmente en la etapa IV, pero cada etapa posee a su vez una alimentación de vapor alterna. Cada etapa del desodorizador se encuentra en un intervalo de temperatura de entre 250°-270°C. La columna opera bajo un vacío de 0,4 a 0,6 kPa, que se logra mediante un sistema de bombas eyectoras y condensadores barométricos. Para tener una idea de la estructura del desodorizador industrial se muestra la figura N°3.

El sistema por su diseño, aunque entra en la categoría de bandejas en flujo cruzado bajo operación semicontinua, una vez que se ha arrancado y alcanzado condiciones de estado estacionario, opera en forma continua, puesto que hay una alimentación y una salida constante de aceite al mismo. Por encima de la cámara I, la columna posee una campana cónica con una base de 1,2 m de diámetro, donde choca el vapor en ascenso con la cara inferior, para desviarse en forma lateral y seguir su recorrido. Luego que el vapor con el contenido de la materia volátil supera la campana, entra a un lecho fijo constituido por un relleno compacto donde es rociado con una corriente de agua y ácidos grasos que promueven la condensación de la mayor parte de los componentes volátiles presentes en el vapor, principalmente ácidos grasos.

Esta corriente líquida se desliza por la cara superior de la campana para no contaminar el aceite de la etapa I, y es impulsada a través de una bomba que eleva su presión entre 100 y 250 kPa, para pasar por medio de un intercambiador de flujo cruzado, donde por contacto indirecto con agua de enfriamiento, disminuye su temperatura de 62°-75°C a 54°-62°C. Esta corriente de ácidos grasos se dirige a una bifurcación, donde una de las corrientes se integra al circuito que alimenta al condensador de ácidos grasos, mientras que la otra va a parar a un tanque de almacenamiento de ácidos grasos.

Figura N°3: Esquema del Desodorizador industrial



El aceite ya desodorizado proveniente de la etapa IV, que se encuentra a una temperatura de 250°-270°C, pasa a través de una bomba que eleva su presión entre 120 y 200 kPa, para luego ser conducido al intercambiador en espiral, el cual disminuye su temperatura a 125°-155°C por contacto indirecto con el aceite que entra al desodorizador. Este aceite desodorizado sigue su recorrido hacia un tanque donde de ser necesario, se inyecta una corriente de vapor para eliminar cualquier traza de componentes volátiles que no haya sido totalmente eliminado durante el arrastre con vapor en la columna.

Seguidamente, el aceite es impulsado a través de una bomba que lo lleva a presiones de entre 300 y 700 kPa, para conducirlo a un intercambiador de flujo cruzado y disminuir su temperatura a 25°-32°C, por medio de contacto indirecto con agua de enfriamiento. Este aceite pasa a través de un par de filtros de seguridad Gaff en donde se encuentra el punto en el cual se toma la muestra de aceite que será sometida a análisis, para determinar su requisito de calidad. Finalmente el aceite desodorizado es conducido a los tanques de almacenamiento de aceite refinado, en espera de su proceso de envasado.

3.2. Generalidades de la Desodorización

La desodorización es el proceso que tiene por objeto la eliminación de sustancias que comunican a los aceites sabores y olores desagradables. Muchos aceites, ya sean por su sabor natural o por ciertas transformaciones sufridas por la materia prima durante su almacenamiento o tratamientos en el proceso de elaboración, requieren que el aceite extraído sea refinado, siendo la “desodorización” la última etapa del proceso, concluida esta el aceite no debe ser sometido a ninguna

otra manipulación o tratamiento por el riesgo de que se contamine, solo debe ser almacenado en tanques de depósito bajo atmósferas de nitrógeno y temperatura controlada.

Es importante destacar que el término “desodorización”, solo involucra las sustancias que confieren olor y sabor como ciertas cetonas, aldehídos, hidrocarburos insaturados, compuestos oxidados, entre otros, sin embargo, se puede decir que también ocurre otro fenómeno como es la “destilación”, este proceso hace referencia a los ácidos grasos libres y otros compuestos insípidos e inodoros, estables frente al calor como los esteroides y tocoferoles, a pesar de la diferencia de cada proceso corrientemente se designa “desodorización” al conjunto sin diferenciar ambos términos.

Este proceso de eliminación se lleva a cabo por medio de una corriente de vapor de agua, o algún otro medio de arrastre que no intervenga químicamente con el aceite (como Nitrógeno, por ejemplo), de baja presión (200-300 kPa), con alto vacío (0,4-0,8 kPa) y alta temperatura (180°-270°C), debido a que bajo estas condiciones los triglicéridos no son volátiles por tener baja presión de vapor.

Por lo tanto son condiciones esenciales para una correcta operación de desodorización lo siguiente:

- a) La temperatura debe ser suficientemente alta, para que la presión de vapor de las impurezas sea convenientemente alta.
- b) La presión absoluta en el desodorizador debe ser baja para permitir la ebullición de las trazas de impurezas desde la superficie expuesta.
- c) Es necesaria una agitación constante del aceite para exponer nuevas superficies a las bajas presiones reinantes.

-
-
- d) Se requiere una adecuada velocidad y caudal de vapor de arrastre, y cuidadosa distribución del mismo. (Foscarini, 1994).

3.2.1. Necesidad de Vapor

Para determinar la cantidad de vapor de agua necesaria para llevar a cabo el proceso se toma como base dos leyes fundamentales: la ley de Raoult y la ley de Dalton, ellas son:

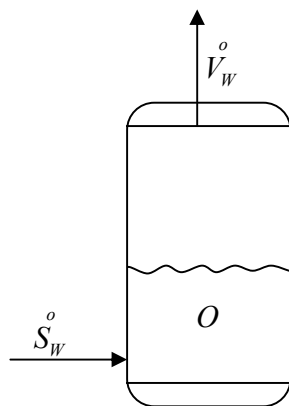
$$P_A = x_A * P_A^o \quad (1)$$

$$P_A = y_A * P_T \quad (2)$$

A continuación se presenta el balance de materia cuando el proceso es discontinuo y cuando el proceso es continuo:

3.2.1.1. Proceso discontinuo

Haciendo referencia a una desodorización discontinua o batch, se observa que el balance de materia en base molar es:



$$\frac{dO}{dt} = S_W^o - V_W^o \quad (3)$$

La fase líquida se compone de triglicéridos, ácidos grasos libres y demás componentes volátiles y la fase vapor está constituida por ácidos grasos libres, vapor de agua y componentes volátiles.

Tomando como componente clave los ácidos grasos libres, representativo como el más volátil del aceite, en consecuencia se cumple, de acuerdo a las ecuaciones (1) y (2)

$$x_A * P_A^o(T) = y_A * P_T \quad (4)$$

Válida únicamente para un sistema ideal, cuyo coeficiente de actividad $\gamma_A = 1$, en sistemas reales puede variar según el tipo de aceite con valores que oscilan entre 0,63 a 1,4, por lo que la ecuación es:

$$x_A * \gamma_A * P_A^o = y_A * P_T \quad (5)$$

Luego el balance para el componente (ácidos grasos libres):

$$\frac{d(O * x_A)}{dt} = -V_W^o * y_A \equiv -V_W^o * \frac{x_A * P_A^o(T)}{P_T} \quad (6)$$

Siendo el triglicérido el constituyente que queda prácticamente inalterado, por lo tanto por hipótesis:

$$O \cong O(ctte) \quad (7)$$

De las ecuaciones (3) y (4) resulta:

$$S_W^o \cong V_W^o \cong \dot{W}^o$$

$$O * \frac{d x_A}{dt} = -\dot{W}^o * \frac{x_A * P_A^o(T)}{P_T} \quad (8)$$

Separando variables e integrando:

$$-\int_{x_{Ai}}^{x_{Af}} \frac{d x_a}{x_A} = \frac{P_A^o(T)}{P_T * O} \int_0^t \dot{W}^o dt \quad (9)$$

Llamando a:

$$\int_0^t \dot{W}^o dt \cong W$$

Luego.

$$\ln \frac{x_{Ai}}{x_{Af}} = W * \frac{P_A^o(T)}{P_T * O} \quad (10)$$

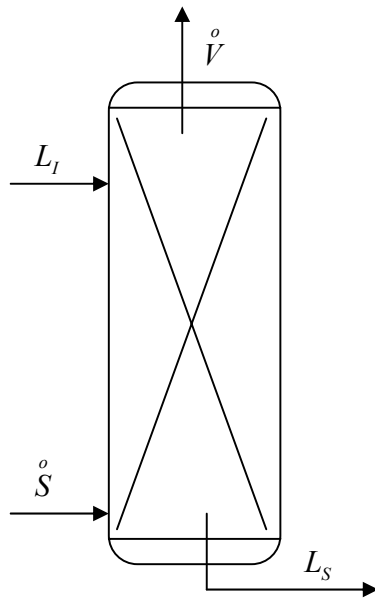
De otro modo:

$$W = \frac{P_T * O}{P_A^o(T) * E} \ln \frac{x_{Ai}}{x_{Af}} \quad (11)$$

En donde se introduce el término E que representa la eficiencia de la destilación o de vaporización, mas adelante se da una explicación detallada de este parámetro.

3.2.1.2. Proceso Continuo

El balance de materia en base molar es el siguiente:



$$L_I + \overset{\circ}{S} = L_S + \overset{\circ}{V} \quad (12)$$

considerando que los componentes clave para el proceso de desodorización serán los ácidos grasos, se tiene:

$$L_I * x_{Ai} = L_S * x_{As} + \overset{\circ}{V} * y_A \quad (13)$$

Suponiendo que la cantidad de aceite (en base a los triglicéridos) resulta inalterada, se puede establecer por hipótesis:

$$L_I = L_S = L \quad (14)$$

De acuerdo a la ecuación (12) resulta:

$$\overset{o}{S} = \overset{o}{V} \quad (15)$$

y

$$L_I * (x_{Ai} - x_{As}) = \overset{o}{V} * y_A = \overset{o}{S} * y_A \quad (16)$$

Por lo que:

$$\overset{o}{S} = \frac{L * (x_{Ai} - x_{As})}{y_A} \quad (17)$$

Si se considera, en principio, que el sistema es ideal y que las leyes de Raoult y de Dalton son válidas, la ecuación (4) queda:

$$y_A \cong \frac{P_A^o(T) * x_{Ai}}{P_T} \quad (18)$$

Implica teóricamente, un número infinito de etapas, con lo que la ecuación (17) queda:

$$\overset{o}{S} = \frac{L * (x_{Ai} - x_{As})}{x_{Ai}} \frac{P_T}{P_A^o * E} \quad (19)$$

En donde ya se incorporó el concepto de eficiencia de vaporización, que también aparece en el caso discontinuo.

La cantidad de gas necesaria para la desodorización (o el tiempo requerido para una velocidad de vaporización dada) es por lo tanto:

- a) Directamente proporcional a la cantidad de aceite
 - b) Directamente proporcional a la presión absoluta del desodorizador
-
-

-
-
- c) Inversamente proporcional a la presión de vapor de los ácidos grasos puros, a la temperatura de operación
 - d) Inversamente proporcional a la eficiencia de la vaporización
 - e) Directamente proporcional al logaritmo de la relación entre las concentraciones iniciales y finales de los ácidos grasos libres presentes en el aceite.

3.2.1.3. Eficiencia de Vaporización

La eficiencia de vaporización es una medida del grado al que se satura el gas de arrastre de ácidos grasos, a su paso por el aceite. De la teoría de la doble capa de Withman, sobre la adsorción de gases, se deduce que, en cualquier instante, la velocidad de transferencia de la sustancia volátil, desde del aceite a una burbuja de gas, es igual a la diferencia entre la presión de saturación en ésta y la presión real, multiplicada por el área superficial de la burbuja y por una constante característica del aceite y el gas.

Se puede escribir:

$$\frac{dp_A}{dt} = K * A_b * (P_A^0 - p_A) \quad (20)$$

$$E = \frac{p_A}{P_A^0} \quad (21)$$

Integrando las ecuaciones (20) y (21) se tiene:

$$E = 1 - e^{-Ab * K * t_c} \quad (22)$$

De lo que se deduce que la eficiencia de la vaporización aumenta al incrementar la superficie de la burbuja y el tiempo de contacto entre ésta y el aceite.

Las ecuaciones anteriores de la (1) a la (19) se aplican estrictamente solo a soluciones ideales de materias extrañas en el aceite, exceptuando la ecuación (5) que involucra al término de Coeficiente de Actividad. Virtualmente, todos los sistemas reales se desvían en cierto grado del estado ideal, por lo cual la eficiencia de vaporización, calculada por la ecuación (22), será mayor que el valor verdadero, si la desviación fuera negativa o menor si fuera positiva. Es importante recalcar que el término de “Eficiencia” en este contexto, se refiere a la efectividad que tiene el proceso y no al concepto se maneja en proceso de separación en donde no existen valores mayores a uno para este parámetro, es por ello que a partir de ahora se usará el término de “Efectividad” para evitar confusiones.

Parece totalmente probable que un aceite que contiene un porcentaje moderado de ácidos grasos libres, no se desvía mayormente del estado ideal, por lo cual la efectividad máxima de vaporización aparente no está muy lejos de la unidad. Que esto sucede y que se obtienen en realidad en la práctica industrial efectividades de vaporización razonablemente elevadas lo parece indicar el hecho de que no existe ninguna correlación entre presión y efectividad de vaporización de la desodorización industrial, dentro del rango de presiones que oscilan entre los 6 y los 25 mmHg. (Bailey, 1967).

3.2.2. Influencia de las Variables del Proceso

A. Influencia de la Temperatura

La temperatura a la que se realiza la desodorización tiene gran efecto sobre la cantidad de gas requerido y, por lo tanto, sobre el tiempo consumido en la operación.

Anteriormente, se ha hecho notar que el gas necesario es inversamente proporcional a la presión de vapor de los componentes volátiles puros del aceite, evaluada a la temperatura de operación. Según la ecuación de Clausius-Clapeyron, que relaciona la presión de vapor de una sustancia, con su temperatura, el logaritmo de la presión de vapor de los componentes volátiles es, dentro de ciertos límites, aproximadamente proporcional a su temperatura absoluta. De este modo, si un incremento dado en la temperatura dobla la volatilidad de los ácidos grasos libres, otro incremento igual lo cuadruplica.

Este incremento rápido de la presión de vapor, debido a un aumento en la temperatura, se puede observar a través del siguiente ejemplo de valores de presión de vapor del ácido palmítico a diferentes temperaturas:

Tabla N°1: Presiones de Vapor del ácido palmítico

Temperatura (°C)	Presión de Vapor (mmHg)
177	1,8
204	7,4
232	25
260	72

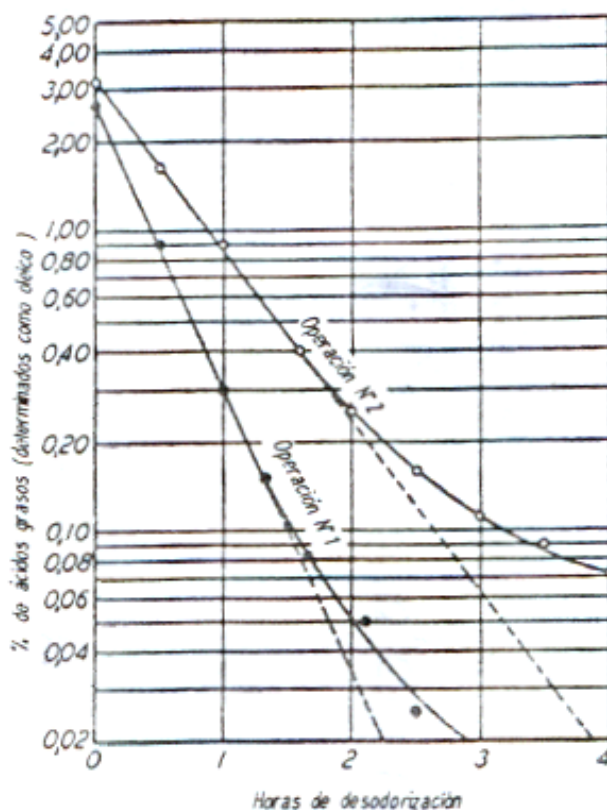
Como se puede observar, si se aumenta la temperatura de la desodorización, de 177 a 204°C, la velocidad de eliminación de las sustancias odoríferas puede esperarse que aumente el triple; y otro aumento triple se producirá cuando la temperatura suba a 232°C. Dicho de otra forma, para obtener un sabor y olor determinados, en el producto acabado, se requerirá tres veces más de tiempo de desodorización a 177°C que a 204°C, y nueve veces más que a 232°C.

B. Influencia de la presión de vacío

Tal como se dijo anteriormente, la cantidad de gas necesaria para la desodorización es directamente proporcional a la presión absoluta. Por tanto, para que la operación resulte lo más económica posible, el vacío debe ser tan alto como se pueda. Si por emplear un vacío defectuoso o por mal funcionamiento de la instalación, la presión no baja de 12 mmHg, la necesidad de gas se duplica y, si la presión no llega a ser inferior a 25 mmHg, se cuadruplica.

La figura N°4 evidencia la gran influencia de la presión sobre el logro de bajos contenidos en ácidos grasos libres; a este respecto, es ventajoso el empleo de alto vacío en la desodorización, ya que conduce a economía en la operación, a una desodorización más rápida y a un menor porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite terminado.

Figura N°4: Influencia de la presión de vacío en la desodorización de aceite de palma (Bailey, 1967).



C. Influencia del tiempo y la velocidad de arrastre

En la desodorización discontinua ordinaria, la efectividad de la utilización del gas de arrastre, varía poco con la velocidad de ésta, al menos dentro de los límites normales. Sin embargo, en aparatos de tipo continuo o semicontinuos, provistos de pantallas, en donde el aceite borbotea, estando en capas poco profundas y donde la salpicadura del aceite sobre las placas produce la separación del aceite y el gas y la creación de interfase aceite-gas, son muy grandes, la eficiencia del borboteo aumenta con su velocidad. Por supuesto, que, en todo caso, la velocidad de borboteo debe

mantenerse por debajo de un valor, en el cual empiecen a producirse arrastres mecánicos.

El tiempo necesario para una desodorización eficaz es, simplemente, el que hace falta para poder pasar suficiente gas a través del aceite, como para reducir los componentes odoríferos al nivel deseado. Aunque se ha sugerido frecuentemente que estos componentes se pueden polimerizar o alterar por el calor, por lo que debe existir un tiempo mínimo, lo mismo que una cantidad de gas de borboteo mínima, para conseguir una buena desodorización, se hace necesario tomar en cuenta la influencia de la temperatura sobre esta variable para evitar que éste fenómeno ocurra. Para cualquier velocidad, el mínimo de tiempo no excede de una hora, teniéndose una desodorización muy eficaz a altas temperaturas, en los equipos modernos para este tiempo

D. Influencia de las características del desodorizador.

Teóricamente, se produce menos hidrólisis del aceite y, por lo tanto, se puede reducir su contenido en ácidos grasos libres a los niveles más bajos, si se borbotea en capas poco profundas, en vez de hacerlo en capas gruesas, y si la presión hidráulica media del aceite sobre las burbujas de gas inyectado es relativamente alta. Si se comparan los resultados de borbotear capas de aceite, cuyo grosor varía desde algunos centímetros, hasta alrededor de un metro, se puede observar que existe una ligera inclinación hacia acideces bajas, en las capas menos profundas. Sin embargo, el factor de profundidad de la capa es más bien menos importante, a este respecto, que la presión absoluta ejercida sobre el aceite. Como ya se dijo, la desodorización, en instalaciones discontinuas eficientes, que trabajan a una presión de 6 mmHg, pueden llegar a disminuir el contenido en ácidos grasos libres de la mayor parte de los aceites, hasta alrededor del 0,015 al 0,03%; por lo cual, no existe gran diferencia con

los aceites desodorizados en equipos continuos o semicontinuos, donde la capa de aceite es menos profunda. (Bailey, 1967).

3.2.3. Equipos de Desodorización

Actualmente se usan tres tipos diferentes de equipos de desodorización, clasificados según su diseño, y a nivel industrial el gas de arrastre utilizado es vapor de agua:

⌘ Flujo Cruzado Discontinuo: En este equipo se carga el aceite en una cámara y el vapor de arrastre se inyecta cerca del fondo mediante un dispositivo de distribución para poner el vapor en íntimo contacto con el aceite. La operación puede ser llevada a cabo en una sola bandeja o en una serie de bandejas. Este proceso se puede describir como una destilación por vapor en un reactor de tanque agitado. Mientras el vapor pasa a través del aceite, las moléculas volátiles son transferidas por medio del área superficial al interior de la burbuja de vapor, disminuyendo la cantidad de éstas sustancias volátiles en el aceite, en un tiempo necesario para lograr las especificaciones del producto. Finalizando el proceso, las concentraciones de volátiles son bajas, afectando la presión parcial de equilibrio y produciendo una baja utilización de vapor.

Actualmente en el mercado existen diseños comerciales de desodorizadores que son semicontinuos, de bandejas múltiples. El proceso de arrastre es, en principio, el mismo que en un proceso discontinuo de una bandeja; en este caso el tiempo se divide en el número de cámaras existentes para lograr un flujo pseudo continuo. El proceso de arrastre comienza en una bandeja, luego se interrumpe cuando se descarga el aceite en la bandeja siguiente, donde continúa la separación. Los tipos semicontinuos sufren las mismas limitaciones en la utilización del vapor de arrastre

que el del tipo discontinuo simple, sin embargo, ofrecen otras características, como permitir una entrada y una salida continua, teniendo como resultado una recuperación térmica simple y eficaz.

Algunos factores que afectan la eficiencia del proceso discontinuo de flujo cruzado son los siguientes:

- ✓ Fuerza impulsora dependiente del tiempo: La concentración de los componentes volátiles se reduce en función del tiempo, dando como resultado una menor presión parcial de equilibrio del componente volátil y una menor fuerza impulsora de la transferencia de masa durante el proceso.
- ✓ Etapa de equilibrio: Solo se puede obtener una etapa de equilibrio en el modo de flujo cruzado, limitando considerablemente la velocidad de arrastre.
- ✓ Volumen de burbujas y área de contacto: El vapor de arrastre se inyecta cerca del fondo de la columna, y el área de contacto disponible para el intercambio de masa depende del tamaño de las burbujas y el volumen del vapor. Cuando las burbujas de vapor se elevan a través del aceite, el cambio de presión causa una expansión del volumen de la burbuja. Siempre que todas las burbujas se encuentren intactas también aumenta el área superficial total, pese a ello, a determinado volumen de vapor, probablemente establecido por la tensión superficial, la burbuja se torna inestable y colapsa

Los diseños actuales discontinuos o de bandeja están equipados con bombas de elevación de vapor (bombas *mamuth*), que aumentan el contacto entre las fases y

reducen los efectos negativos de la altura del aceite. Dichos dispositivos pueden aumentar considerablemente la eficiencia. Por otra parte, las bombas de elevación de vapor exigen operar con una determinada carga de vapor, lo cual restringe la dosificación mínima del mismo.

⌘ Flujo cruzado continuo (horizontal): En este diseño, el aceite fluye de manera continua en dirección casi horizontal, mientras se inyecta el vapor en el aceite y se eleva a través del líquido en forma de flujo cruzado.

Las consideraciones de equilibrio válidas para diseños discontinuos también se aplican a este sistema, si el flujo de aceite es completamente de tipo flujo pistón, es decir, no se produce retromezcla del aceite tratado y subtratado, aunque es evidente que esto no es perfectamente posible. En este tipo de equipos, la máxima eficiencia se logra en caso de que la retromezcla sea nula lo que implica que la fuerza impulsora de estos diseños es generalmente más baja que en flujo cruzado operando en diseños de carácter discontinuo.

El flujo paralelo puede estar presente en algunas partes del equipo, lo cual reduce aún más la fuerza impulsora, ya que este tipo de flujo siempre produce una fuerza impulsora de equilibrio menor que la del flujo cruzado.

⌘ Sistemas de contracorriente: El tercer tipo de desodorizador es el de *película delgada*. Este término hace referencia a la manera en que el aceite se distribuye por toda la columna, especialmente en una gran área superficial, mediante un relleno compacto y estructurado. Las características más importantes, válidas para la mayoría de las columnas de este tipo, son el verdadero proceso continuo y el contacto por contracorriente entre el vapor y el aceite. El aceite desciende por gravedad y se

inyecta vapor por la parte inferior de la columna. El total aprovechamiento de la elevada fuerza impulsora de equilibrio requiere una gran superficie de contacto proporcionada por un relleno estructurado.

Desde un punto de vista teórico, la desodorización en película delgada, es superior al sistema semicontínuo de bandejas comúnmente utilizado, ya que en este último la superficie disponible limita la velocidad de destilación de componentes indeseables, y el hecho de poseer una profundidad fija de aceite en la bandeja, da un volumen bastante grande de retención. En ambos sistemas, la velocidad de destilación puede ser afectada por un incremento del vapor de destilación, por la temperatura, o por utilizar una presión de vacío determinada. Debido a que la velocidad de destilación en una columna de relleno es mucho más rápida que en una de bandeja, es obvio que para una temperatura y una presión de vacío fijas, una columna estructurada requerirá menos vapor de arrastre que una bandeja, para dar el mismo nivel de eficiencia, lo que se traduce en costos de utilización de vapor más bajos.

Por otra parte, una elevada área superficial, como la que ofrece este tipo de diseño, aumenta la caída de presión a través del relleno, reduciendo de esta manera la fuerza impulsora al pie de la columna. Otra desventaja de este tipo de sistemas, es que los depósitos de partículas tienden a romper la película delgada de aceite reduciendo así la eficacia del sistema. Las dos razones más importantes del ensuciamiento se deben a la formación de productos de condensación-reacción de los fosfolípidos y a la polimerización de los triglicéridos por el oxígeno. Sin embargo, estos fenómenos pueden disminuirse mediante el diseño correcto de la columna, un adecuado procesamiento previo y la desareación completa en el equipo, así como evitando fugas en la operación.

A parte de las consideraciones concernientes al diseño y funcionamiento de los tipos de desodorizadores que se han planteado, existen para todos ellos, algunos criterios adicionales que se deben tener en cuenta para garantizar su adecuado funcionamiento, y estos son, el tipo de material de construcción empleado, que en los desodorizadores modernos es generalmente de acero inoxidable tipo 304 (aleación acero—cromo) debido a que los materiales como el cobre y el hierro poseen una actividad catalítica fuertemente promotora de las reacciones de oxidación del aceite. También esta la estabilidad del aceite que se verá adversamente afectada si el mismo está en contacto con el aire a las temperaturas de desodorización, por lo que se hace estrictamente necesario que todo el sistema de desodorización, para un adecuado mecanismo de desaireación, se evite la posibilidad del contacto de oxígeno con el aceite durante la desodorización. Por último, se tiene el factor de tratamiento térmico, que es necesario, puesto que existen reacciones dentro del seno que son indispensables para proveer al mismo de estabilidad después de la desodorización. Este tratamiento térmico, también genera un grado de blanqueo en el aceite producto. Tanto las reacciones proestabilizantes como el grado de blanqueo, son dependientes del tiempo y la temperatura, por lo que los desodorizadores comerciales deberán proveer de períodos de retención y temperaturas de desodorización adecuadas para que esto ocurra. (Balchen, 1999).

3.2.4. Pruebas de Control de Calidad

Generalmente las grasas y los aceites se someten a pruebas de control de calidad con los fines siguientes: obtener información relacionada con su cumplimiento en aplicaciones específicas en los alimentos; medir el grado de deterioro (como rancidez u oxidación) así como la estabilidad de la grasa contra tales cambios; comparar las propiedades de las grasas con las especificaciones de los compradores; identificar grasas y aceites para prevenir la representación falsa o

adulteración, entre otras. Las principales propiedades físicas y químicas de grasas y aceites se han medido de varios modos que han originado diversos términos comúnmente asociados con ellos. (Potter, 1972).

Es por ello que para todo producto terminado de un proceso de transformación de materias primas, existen indicadores que determinan la calidad del mismo, características estas que establecen que dicho producto se encuentran en condiciones aceptables para su utilización. El aceite de maíz, por ser un producto de carácter comestibles, no escapa a los patrones impuestos por los actuales sistemas de control de calidad, es por esta razón que se han establecido ciertos requisitos de calidad, que el aceite de maíz debe cumplir para poder ser puesto en el mercado de consumidores. Estos requisitos hablan en términos fisicoquímicos de la estructura interna del aceite como de sus propiedades organolépticas, y van a depender de las condiciones bajo las cuales fue llevado a cabo su procesamiento. Los principales indicadores de calidad del aceite de maíz son: la acidez, el índice de peróxidos, los colores rojo y amarillo, el olor y el sabor; y se especifican en la tabla N°2.

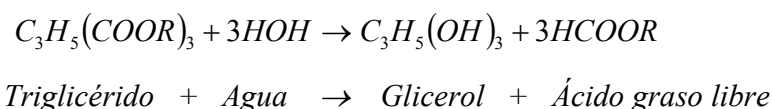
Tabla N°2 Requisitos de calidad del aceite de maíz.

Características	Requisito Máximo	REMAVENCA	Método de Ensayo
Color	Rojo 3,0	Rojo 1,5	Covenin 1191
	Amarillo 30,0	Amarillo 15,0	
Acidez libre (% como ácido oleico)	0,10	0,06	Covenin 325
Índice de Peróxido (meqO ₂ /Kg)	En planta 2	0,0	Covenin 508
	En mercado 5		

Fuente: Norma COVENIN 743:2000

3.2.4.1. Acidez:

La presencia natural de acidez libre en las grasas, es decir, de ácidos grasos no combinados, es el resultado de la hidrólisis de algunos triglicéridos que se producen de acuerdo a la siguiente reacción:



Los ácidos grasos libres en el aceite de maíz, se expresan como porcentaje de ácido oleico, sobre la suposición de que el peso molecular de ácido libre es igual al del ácido oleico, sin embargo no toda la acidez que resulta de la hidrólisis de las grasas es necesariamente oleica, ni tampoco el peso molecular promedio del ácido graso libre tiene que ser necesariamente equivalente al oleico. Las diferencias entre los resultados obtenidos al aplicar este supuesto y el valor verdadero, puede ser insignificante, cuando la concentración de ácidos grasos en el aceite es baja, pero llega a ser significativa en aceites cuyo contenido de acidez libre es bastante elevado.

El porcentaje de acidez libre presente en un aceite sirve como indicativo químico de la cantidad de cadenas de ácidos grasos que han sido hidrolizadas desde la estructura básica del triglicérido, lo que se traduce como un medidor de la capacidad de degradación del aceite al momento de ser utilizado. La acidez incide directamente también en propiedades organolépticas del aceite, como lo son el olor y el sabor, que se tornan desagradables, cuando el nivel de los ácidos grasos en el mismo es elevado; de ahí que sea sumamente importante controlar y disminuir hasta los límites permisibles, la cantidad de ácidos grasos libres que se encuentran en el aceite.

Otro inconveniente que se presente con los ácidos grasos libres durante el proceso de desodorización, es la isomerización de los ácidos *cis* en ácidos *trans*. Si los triglicéridos en estudio, presentan un alto nivel de ácidos *trans*, estos se caracterizan por ser más estables que los respectivos *cis*, trayendo consigo la desventaja, de que al unirse forman estructuras moleculares con bajo punto de fusión y alto punto de ebullición, cercanos a los de grasas saturadas, lo que dificulta considerablemente su arrastre durante la desodorización.

Otro de los principales problemas que traen consigo los ácidos *trans*, es que este tipo de compuestos se vinculan con problemas nocivos para la salud, ya que reduce los niveles sanguíneos de colesterol de alta densidad, conocido como colesterol bueno y a su vez incrementa los niveles de colesterol de baja densidad, conocido como colesterol malo, lo que implica que dichos ácidos *trans*, sean vinculados en enfermedades cardiovasculares.

La acidez se determina como porcentaje de ácido oleico por medio de la ecuación (23), bajo un procedimiento experimental en donde se realiza una titulación con hidróxido de sodio:

$$Ac = \frac{V_{NaOH} * N_{NaOH} * 0,282}{M_{aceite}} * 100 \quad (23)$$

3.2.4.2. Índice de Peróxido:

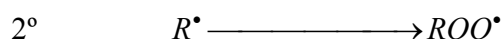
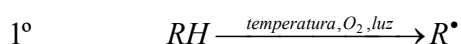
Cuando se hace referencia a los peróxidos se entiende como los productos de descomposición primaria de la oxidación de las grasas, cualquiera sea su composición. La reacción secundaria de la oxidación incluye ácidos, aldehídos, cetonas, óxidos de etileno, alcoholes, entre otras sustancias. La susceptibilidad de los

aceites a la oxidación depende principalmente del grado de insaturación y de la posición de los dobles enlaces de los ácidos grasos poliinsaturados.

La oxidación de los aceites se lleva cabo en tres pasos:

- ✓ Formación del radical libre.
- ✓ Formación del hidroperóxido.
- ✓ Descomposición del hidroperóxido en productos secundarios de oxidación.

El primer paso se lleva a cabo por la reacción de un ácido graso insaturado (RH) con el oxígeno. Esta reacción es catalizada por la temperatura, luz, humedad y presencia de trazas de metales. En este primer paso se obtienen los radicales libres ($R^\bullet$). En el segundo paso reacciona el radical ($ROO^\bullet$), el cual reacciona de nuevo con un ácido graso insaturado y se forma hidroperóxido (ROOH). El tercer paso de la reacción de oxidación consiste en la descomposición de los hidroperóxidos en aldehídos, cetonas, ésteres y compuestos volátiles, los cuales le otorgan rancidez, malos olores y sabores al aceite. Las reacciones que se llevan a cabo en este proceso de oxidación se muestran a continuación:



El índice de peróxido, es la medida que se emplea para determinar si en un aceite o grasa ha habido oxidación, y expresa el contenido de oxígeno reactivo en el mismo, en términos de miliequivalentes de O_2 por Kg de muestra.

Para determinar los miliequivalentes presentes en el aceite se utiliza la siguiente ecuación:

$$IP = \frac{V_T * N_T * 1000}{M_{aceite}} \quad (24)$$

3.2.4.3. Color:

La palabra “color” describe la sensación de la luz visible tal como es vista por el ojo del observador e interpretada por el cerebro. A medida que cambian la cantidad y calidad de la luz visible y a medida que el objeto iluminado posee la propiedad de absorber o reflejar toda o parte de la luz que cae sobre él, varía la sensación de color. El color es una sensación tridimensional, cuyas tres dimensiones son: el tono, que describe el tipo de color, la saturación, que describe la pureza del color; y el brillo que es una medida de la luminosidad del color.

El color también se mide como guía de cuestiones prácticas que han de tenerse en cuenta durante la refinación de los aceites comestibles. Algunos aceites crudos poseen una pigmentación muy alta, atribuible a condiciones de cultivo adversas. Como resultado, el color tiende a oscurecerse durante el almacenamiento; una medida temprana del mismo puede alterar a nivel industrial sobre los potenciales problemas de blanqueo y desodorización, y de mezclas que puedan resultar antieconómicas. Los datos de color que se obtienen normalmente sobre un aceite sospechoso de ser inestable, indican la irregularidad y ayudan a evitar decisiones erráticas con respecto a las mezclas.

Existen muchas razones por las cuales es importante la medición del color de aceites y grasas, pero en definitiva todo se relaciona con el costo de refinación, la calidad del producto terminado y el aspecto que presente el producto al usuario final.

El color de los aceites se mide en la actualidad con la ayuda de colorímetros. Básicamente el proceso consiste en colocar, en una celda de 13,34 cm de vidrio óptico, la muestra de aceite y someterlo en el aparato a condiciones angulares y de intensidad de luz estándar, para luego buscar el color más apropiado, superponiendo una mezcla de patrones rojo, azul y amarillo sobre el campo de referencia contiguo al que contiene la muestra de aceite. La igualación del color resultante, se expresa en unidades Lovibond de rojo, azul y amarillo. Los patrones Lovibond de color se aceptan casi en todo el mundo, como medio seguro de asignar valores de color precisos a los aceites y a las grasas, y por ende se usan como medio de comunicación en la industria. (Norma Covenin 743:2000)

3.3. Simulación de Procesos Químicos en Computadora.

Es sabido que el procedimiento metodológico fundamental para resolver un problema en ingeniería consiste en representarlo en una forma adecuada, para así poder lograr una sustitución del sistema real (equipo, proceso, etc.) por uno más adecuado para el tratamiento formal. Por lo general, las herramientas lógico-matemáticas brindan un marco útil para representar mediante un sistema de símbolos y reglas, el comportamiento de los sistemas reales.

Bajo el método científico, por ejemplo, se consolidan leyes y teorías en diversas ramas del conocimiento, las cuales son expresables por medio del sistema de ecuaciones diferenciales. En otras palabras, se logra construir un nuevo sistema, del cual se conocen sus *reglas del juego* y símbolos, como un resultado de un proceso de abstracción de la realidad. Obviamente, dado la infinita complejidad de los fenómenos fisicoquímicos, estas construcciones abstractas, conocidas genéricamente como modelos, son sólo meras aproximaciones de la realidad.

De aquí se desprende que si bien el sistema real a estudiar es único, puede existir un número muy grande de modelos asociados al mismo. En efecto, para obtener un modelo que pueda resolverse (es decir que sea útil), resulta necesario adoptar un conjunto de hipótesis. Las necesidades de exactitud que el problema a resolver impone, determinan el conjunto de hipótesis a utilizar. En síntesis, dado el sistema real y los objetivos tecnológicos perseguidos, existirá un conjunto de hipótesis adecuadas que determinarán las características del modelo, o sistema de ecuaciones a resolver.

Resulta evidente que no todo sistema de ecuaciones puede resolverse fácilmente, al menos desde el punto de vista analítico. Esto impulsó a lo largo de la historia limitaciones importantes al tipo de modelos que podían resolverse, o de otra forma, la necesidad de recurrir a hipótesis inadecuadas o restrictivas (simplificaciones) para al menos poder tratar el problema. Es por ello también que en los orígenes de las ciencias tecnológicas los modelos podían ser considerados en gran medida como empíricos, esto es, con parámetros incorporados que surgían de experiencias, y no a partir de los primeros principios o leyes fundamentales.

A medida que evolucionaron las diversas ramas de las matemáticas y con el advenimiento de la ciencia de la computación, poderosa herramienta complementaria al análisis numérico y simbólico, se abrieron caminos revolucionarios. Contar con herramientas más potentes para resolver sistemas de ecuaciones, o lo que es lo mismo, relativizar la necesidad de adoptar hipótesis inadecuadas al plantear modelos para resolver problemas complejos, resultó un gran paso adelante. Más aún, la velocidad de cálculo provocó que la dimensión abordable se incrementara rápidamente.

Dentro de este contexto, lo que se pretende es mostrar cómo implementar modelos para resolver problemas comunes en el campo de la Ingeniería Química, cómo resolverlos desde el punto de vista computacional, y otro punto importante, qué tipos de problemas (modelos) surgen al cubrir distintos aspectos de la ingeniería. En este punto resulta necesario comentar que los problemas de diseño, optimización, simulación dinámica o estacionaria, supervisión de fallas en tiempo real, etc., tienen cada uno particularidades específicas, lo cual a su vez implica la conveniencia de utilizar modelos apropiados para cada caso.

4. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología que se planteó para alcanzar los objetivos propuestos en este proyecto.

1. Se estudiaron las normas y códigos que establecen cuáles son los parámetros de calidad exigidos para lograr la aceptabilidad del aceite de maíz, estipuladas por Fondo Norma, las cuales se nombran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3: Normas Covenin revisadas

COVENIN 743:2001 (3 ^{ra} Revisión)	Aceite Comestible Norma General
COVENIN 325:2001 (3 ^{ra} Revisión)	Aceites y Grasas Vegetales Determinación de la Acidez
COVENIN 508:2001 (2 ^{da} Revisión)	Aceites y Grasas Vegetales Determinación del Índice de Peróxidos
COVENIN 1191:1996 (1 ^{ra} Revisión)	Aceites y Grasas Vegetales Determinación del Color

2. Se consultó bibliografía, documentos y artículos de revistas, donde se establecen las condiciones típicas de operación del proceso de Desodorización y su relación con los indicadores que se evalúan y reportan para cumplir con los parámetros exigidos por las normas de calidad.

3. Se recopilaron datos del proceso industrial asociados a la dependencia que tienen los parámetros de calidad que se reportan (tomando como principal el porcentaje de acidez) con las variables del proceso de Desodorización (presión, temperatura, flujo de aceite y características del vapor de arrastre).

4. El modelo matemático que permitió desarrollar la simulación del proceso se estableció tomando en cuenta el balance de masa y energía realizado en cada una de las etapas del equipo, haciendo las siguientes consideraciones:

a) Se supuso que el sistema Aceite – Vapor de agua es una solución ideal, haciéndose válida la Ley de Raoult, por lo que se usó la ecuación (4) que representa esta ley de equilibrio.

b) Ya que el objetivo principal de la Desodorización es eliminar aquellas sustancias que le dan al aceite sabor y olor desagradables, el balance de masa se realizó bajo la suposición que las sustancias que se transferirán al vapor de agua son los ácidos grasos libres presentes en el aceite, siendo el ácido oleico el componente de interés, ya que el porcentaje de acidez está en función de este ácido graso. Por lo que se determinó la presión de vapor de este componente a través de la ecuación:

$$\ln(P_A^o) = 23,411 - \frac{10516,22}{T} \quad (25)$$

donde la presión está en mbar y la temperatura en grados Kelvin.

5. La ecuación que se usó para realizar la programación de la simulación es la representada por la ecuación (11), deducida anteriormente y haciendo el balance de masa en cada etapa.

El vapor requerido para el proceso se determinó tomando en cuenta el medidor de flujo que posee cada una de las etapas del equipo, siendo éste una placa de orificio con dimensiones de 3,5; 4,5, 6 y 7 mm en la etapa 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

La inyección del vapor está caracterizada por la caída de presión (Δp) para cada placa y por la temperatura del vapor saturado que se requiere para el proceso. En planta por lo general se opera con la caída de presión del diseño del equipo ($\Delta p = 1,3; 1,5; 1,7$ y 2 bar) sin embargo, en ocasiones se opera con un flujo de vapor menor a este con un Δp de 1, 1, 1 y 2 bar. La temperatura de inyección es medida a través de un termómetro ubicada en la línea de alimentación de vapor al proceso.

La composición de entrada es un parámetro conocido y es el valor que se obtiene del proceso previo a esta etapa (del proceso de winterización).

Debido a que los parámetros de calidad y el flujo de aceite están reportados en base másica se realizó el cálculo para obtener estos valores en base molar.

6. El balance de masa se realizó tomando en cuenta que la presión de las etapas 2, 3 y 4 está relacionada con la presión de la primera y con el flujo de vapor inyectado en cada una de ellas, usando la siguiente ecuación para determinar tal presión:

$$P_i = V_i * \frac{P_1}{V_1} \quad (26)$$

Esto se validó con los datos del proceso industrial, determinando así el perfil de concentración entre las etapas y comprobando que la composición que entra al proceso sea igual o próxima a la composición inicial real, ya que el balance fue realizado desde la cuarta etapa hasta la primera.

Una vez obtenido el perfil de concentración y conocidas las demás variables se determinó la efectividad de cada etapa a través de la ecuación (11).

7. Se planteó un procedimiento de cálculo, el cual fue codificado en el lenguaje de programación Visual Basic para crear la interfaz que permita al usuario utilizar la simulación del proceso. El programa tiene tres opciones de trabajo:

- a. Determinar cual es la Temperatura del sistema, dada la Presión, bajo las cuales debe procesarse el aceite para obtener el porcentaje de acidez que se establece la empresa (un porcentaje $\leq 0,05\%$).

El procedimiento que se sigue para ésta opción del programa es el que se presenta a continuación:

- i. El usuario debe introducir los valores correspondientes a flujo másico de aceite a procesar, la acidez inicial del aceite y las características del vapor de arrastre (presión de inyección). Ver figura N°5

Figura N° 5: Interfaz para el calculo de las condiciones de operación

CALCULO DE CONDICIONES DE OPERACIÓN

FLUJO DE ACEITE (kg/h):

ACIDEZ INICIAL (%):

Características del Vapor

Caída de Presión (bar)

☐ Condiciones de Diseño (1.3, 1.5, 1.7, 2)

☐ Condiciones de Operación (1, 1, 1, 2)

Condiciones de Operación

PRESION DE OPERACION (mbar):

TEMPERATURA DE OPERACION (°C):

 **GENERAR RESULTADOS**

 **CERRAR FORMULARIO**

- ii. El usuario debe introducir la Presión de Operación.
- iii. El programa realiza un proceso iterativo con las temperaturas de cada etapa, comenzando por la etapa cuatro y calculando las demás a través del balance de energía, el cual se detalla en el Apéndice C.
- iv. Una vez conocidas las Temperaturas se efectúa el balance de masa que determina las composiciones molares de entrada y salida de cada etapa.

-
-
- v. El programa verifica si la composición de entrada a la primera etapa calculada es igual a la composición real dada por el usuario. Si es igual entonces la temperatura supuesta en la etapa cuatro es la correspondiente a esa etapa. Si no son iguales las composiciones entonces el programa asume otra temperatura.
 - vi. Finalmente el programa muestra como resultado la temperatura de operación, para procesar el aceite y obtener un porcentaje de acidez menor o igual al 0,05%.

b. Determinar que porcentaje de acidez se obtendría dadas las condiciones de operación del proceso.

Para este caso, además de introducir el flujo másico de aceite, la acidez inicial y las características de inyección del vapor, el usuario debe escoger los valores de las variables bajo las cuales desee el que se lleve acabo el proceso y la efectividad correspondiente a la primera etapa, para calcular así de forma directa el porcentaje de acidez que se obtendrá con esas variables de operación, a través de la ecuación (11), despejando la composición final del ácido oleico de la misma Ver figura N° 6

Figura N° 6: Interfaz para el cálculo del porcentaje de acidez

CALCULO DE ACIDEZ FINAL

FLUJO DE ACEITE (kg/h):

ACIDEZ INICIAL (%):

Características del Vapor

Caída de Presión (bar)

☐ Condiciones de Diseño (1.3, 1.7, 1.5, 2)

☐ Condiciones de Operación (1, 1, 1, 2)

Eficacia Primera Etapa

Condiciones de Operación

TEMPERATURA DE OPERACIÓN (°C):

PRESION DE OPERACION (mbar):

Resultados Obtenidos

ACIDEZ FINAL (%):

 **GENERAR RESULTADOS**

 **CERRAR FORMULARIO**

- c. Falla en el suministro del vapor de arrastre.
 - i. El usuario debe introducir los valores correspondientes a flujo másico de aceite a procesar, la acidez inicial del aceite, la presión y temperatura de operación, así como también que porcentaje de vapor de arrastre se va a utilizar a la hora de que se tenga menos vapor para el proceso.

ii. El procedimiento que realiza el programa es similar al de la opción a), ya que lo que se quiere es evaluar que variable conviene más manipular para mantener la calidad del aceite.

8. La validación del programa se realizó a través del uso de los datos recopilados del proceso industrial para estimar cuán alejado está el resultado que arroje la simulación con respecto a los valores reales que se obtienen, tanto de las variables de operación como del porcentaje de acidez.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados que cubren los objetivos propuestos para la investigación:

A. Determinación de la Temperatura de Operación dada la presión bajo la cual se desee operar el equipo.

En la tabla N° 4 se presentan los resultados que arrojó el programa al determinar la temperatura de operación a diferentes presiones y relación de flujos Vapor de Agua – Aceite (V/L), dejando como variable fija la acidez inicial con un valor igual a 1,42 %, para alcanzar así el valor de acidez final establecido por la empresa.

Al observar la tabla se puede apreciar que a medida que disminuye la relación V/L la temperatura aumenta de la misma forma que lo hace la presión, lo que quiere decir que a mayor cantidad de ácidos grasos se necesitará aumentar la presión de vapor de éstos para lograr que se volatilicen.

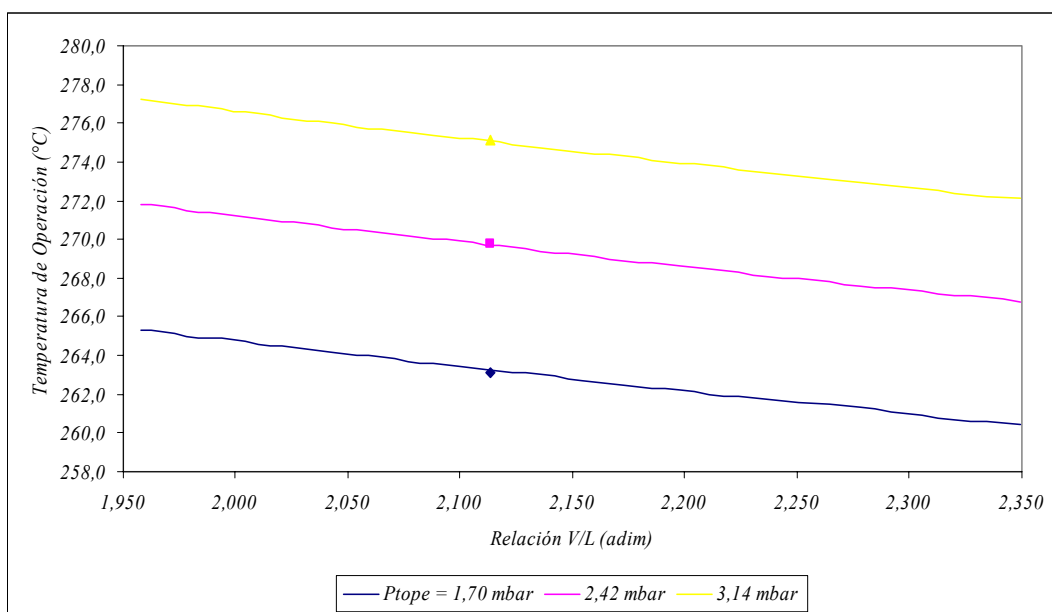
También se observa que para una misma relación de flujo se debe incrementar la temperatura cuando la presión absoluta del sistema es alta, lo cual se justifica ya que los ácidos grasos se volatilizan con mayor facilidad a una alta temperatura y a una presión baja.

Tabla N° 4: Temperatura de Operación a distintas relaciones de flujo V/L.

Vapor de Agua/Aceite (adim)	Temperatura de Operación (°C)		
	P = 1,70 mbar	P = 2,42 mbar	P = 3,14 mbar
2,349	260,4	266,8	272,1
2,335	260,6	267,0	272,2
2,320	260,7	267,1	272,4
2,306	260,9	267,3	272,6
2,292	261,1	267,5	272,8
2,278	261,3	267,6	272,9
2,264	261,5	267,8	273,1
2,251	261,6	268,0	273,3
2,237	261,7	268,1	273,4
2,224	261,9	268,3	273,6
2,211	262,0	268,5	273,8
2,198	262,2	268,6	273,9
2,185	262,3	268,8	274,1
2,173	262,5	268,9	274,3
2,160	262,6	269,1	274,4
2,148	262,8	269,3	274,6
2,136	263,0	269,4	274,7
2,123	263,1	269,6	274,9
2,112	263,3	269,7	275,1
2,100	263,4	269,9	275,2
2,088	263,6	270,0	275,4
2,077	263,7	270,2	275,5
2,065	263,9	270,3	275,7
2,054	264,0	270,5	275,8
2,043	264,2	270,6	276,0
2,032	264,3	270,8	276,1
2,021	264,5	270,9	276,3
2,010	264,6	271,1	276,5
1,999	264,8	271,2	276,6
1,989	264,9	271,4	276,8
1,978	265,0	271,5	276,9
1,968	265,2	271,7	277,1
1,958	265,3	271,8	277,2

Esto se puede observar de forma esquematizada en la figura N° 7, la cual representa la temperatura de operación a distintas presiones y relación de flujos V/L.

Figura N° 7: Temperatura de Operación a distintas relaciones de flujo



En la gráfica anterior se observa que para un valor fijo de presión es necesario aumentar la temperatura de operación del proceso mientras la relación de flujos V/L es baja, es decir, cuando se opera un flujo de aceite grande, ya que hay más ácidos grasos que retirar del aceite y es necesario aumentar su presión de vapor para que los mismos se volatilicen con facilidad.

Al trabajar con un flujo de aceite constante se observa que al aumentar la presión del sistema, es necesario aumentar la temperatura ya que los ácidos grasos se

volatizan más fácilmente a altas temperaturas cuando el vacío es deficiente y a cualquier temperatura mayor.

El comportamiento que se presenta en el gráfico es lineal ya que los resultados fueron obtenidos a través del programa, tomando como variables constantes la acidez inicial y la final, lo que deja como evidencia que las variables involucradas se reflejen de forma lineal en el gráfico.

Es importante resaltar que para los resultados obtenidos por la simulación se determinó el valor de efectividad correspondiente a cada etapa a través de la ecuación (11), teniéndose que la misma está entre 37 y 62 %, siendo la de menor eficiencia la primera etapa y aumentando al paso de las etapas 2, 3 y 4.

A continuación se tiene la tabla N° 5, en donde se reporta la desviación que presentan los resultados que arroja el programa al determinar la temperatura de operación con respecto a la temperatura con la que se opera en el proceso industrial.

Tabla N° 5: Validación del Programa en función de la Temperatura de Operación

Temperatura de Operación (°C) Proceso Industrial	Temperatura de Operación (°C) Programa	% Desviación
268,7	268,2	< 1 %
269,5	269,0	< 1 %
272,1	270,0	< 1 %
269,0	269,9	< 1 %
269,3	267,8	< 1 %
268,5	269,0	< 1 %
270,5	270,5	< 1 %
271,5	269,2	< 1 %
271,6	270,9	< 1 %
269,5	269,4	< 1 %

Los resultados que se presentan en la tabla anterior muestran la desviación que tiene la simulación del proceso con respecto a los datos reales de planta, para ello se tomó una serie de datos reales y se usaron como variables que permitieran determinar, a través del programa, la temperatura de operación del proceso. El porcentaje de desviación obtenido está por debajo del 1 % lo que quiere decir que el programa es una herramienta útil para la simulación del proceso de desodorización para determinar la temperatura a la cual se desee trabajar dada la presión del sistema.

B. Porcentaje de Acidez Final dadas las condiciones de Operación, Presión y Temperatura

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron del programa al determinar el porcentaje de acidez final dadas las condiciones de operación del proceso, presión y temperatura así como también la efectividad correspondiente a la primera etapa, haciendo referencia a la influencia que tienen estas variables sobre este resultado, tomando en cuenta como variables constantes la relación de flujos y la acidez inicial, siendo éstas iguales a 2,088 y 1,13 %, respectivamente. En la tabla N° 6 se reporta los resultados que muestran como influye el flujo de aceite a procesar sobre el porcentaje de acidez final.

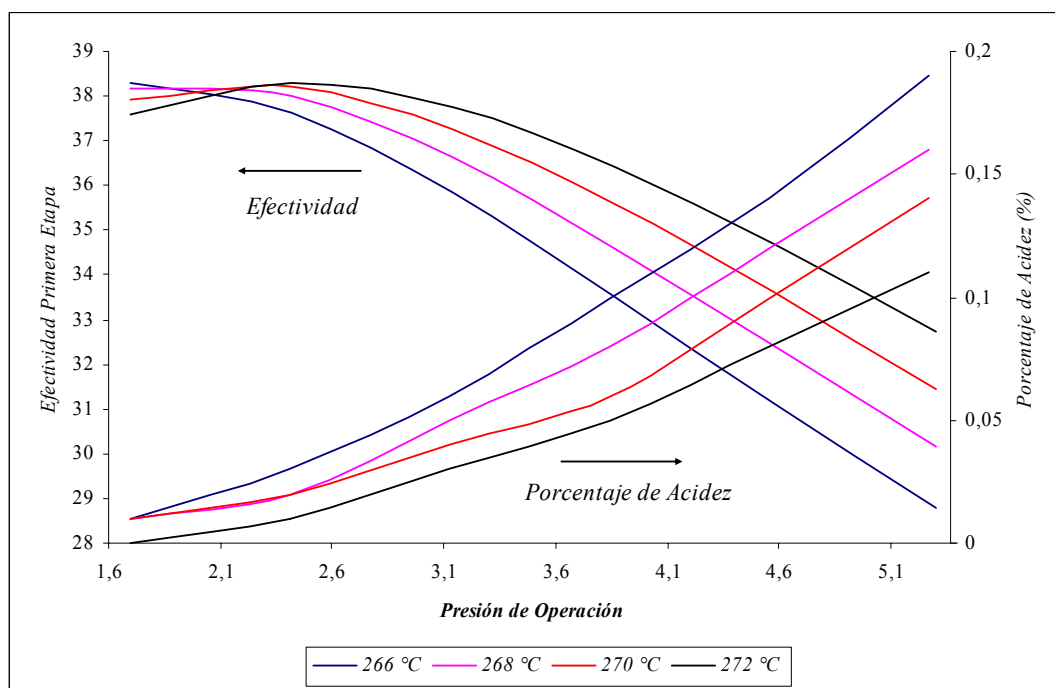
Tabla N° 6: Porcentaje de Acidez final y Efectividad de la primera Etapa

Presión (mbar)	T = 266 °C		T = 268 °C		T = 270 °C		T = 272 °C	
	E₁ (%)	% Acidez Final	E₁ (%)	% Acidez Final	E₁ (%)	% Acidez Final	E₁ (%)	% Acidez Final
1,70	38,29	0,01	38,18	0,01	38,22	0,01	38,29	0,00
2,42	37,62	0,03	38,00	0,02	37,93	0,02	37,57	0,01
3,14	35,83	0,06	36,63	0,05	37,26	0,04	37,75	0,03
3,86	33,53	0,10	34,62	0,08	35,60	0,06	36,43	0,05
4,58	31,10	0,14	32,40	0,12	33,60	0,10	34,67	0,08
5,30	28,78	0,19	30,15	0,16	31,46	0,14	32,73	0,11

En esta tabla se reportan los resultados obtenidos luego de haber realizado la simulación del proceso a través del programa. Se puede observar que a mientras aumenta la presión del sistema se retiran menos ácidos grasos del aceite, lo que también viene dado por la baja efectividad que se tomó para la primera etapa, que disminuye con el aumento de la presión. El valor de la efectividad correspondiente a la primera etapa es bajo, sin embargo la misma incrementa al descender por las 2, 3 y 4, hasta llegar al 100 % en la última etapa.

En la figura N° 8 se graficaron tales resultados, para poder observar así el comportamiento de los mismos obtenidos una vez realizada la simulación del proceso de Desodorización.

Figura N° 8: Porcentaje de Acidez Final.



En la figura anterior se observa la tendencia que tiene la efectividad de la primera etapa con respecto a la presión de operación, siendo tal tendencia decreciente con el aumento de presión, lo que se justifica porque mientras se tenga una mayor presión menos efectivo se hace el proceso. El porcentaje de acidez obtenido a través de la simulación presenta un incremento al tener presiones elevadas lo que es lo esperado debido a que se retiran menos ácidos grasos cuando se opera a altas presiones.

Con respecto a la desviación que presenta el programa con el proceso industrial se puede decir que es casi nula ya que el porcentaje de acidez determinado por el programa es igual prácticamente al que reportan los analistas del Laboratorio Central de la empresa Refinadora de Maíz Venezolana, por lo tanto el programa es una herramienta útil para determinar el porcentaje de acidez de algún aceite en específico dadas las condiciones a las cuales se desea desodorizar el mismo.

La eficacia del proceso se determinó para cada una de las etapas del equipo ya que por el balance de masa y de energía se pudo conocer las composiciones de entrada y salida correspondiente a cada etapa, para ambas opciones de trabajo del programa se obtuvieron las eficiencias a través del modelo matemático planteado, tal resultado mostró que porcentaje de eficiencia es bajo para la primera etapa, ya que se encuentra entre el 36 y 40 %, aumentando progresivamente al descender a las siguientes etapas, el cual llega a pasar del 100 % para la cuarta etapa.

C. Falla en el suministro de vapor de arrastre para el proceso.

El programa de simulación del proceso de desodorización también proporciona resultados útiles cuando existe una falla en el suministro del vapor de arrastre, teniéndose el mismo procedimiento de cálculo que usa el programa para

estimar la temperatura del proceso ya que se estudia que variable se debe manipular (flujo de aceite, temperatura o presión) para mantener la calidad del aceite, es decir, tener un aceite con un porcentaje de acidez oleica igual o menor al 0,05 %.

Por ejemplo si se requiere operar un aceite con un porcentaje de acidez del 1,54 % y solo se cuenta con el 70 % de vapor de arrastre a las condiciones de diseño, es decir, que se cuenta con un flujo de 141,41 kg/h en vez de un flujo de 202,02 kg/h, y se desea mantener la producción y la calidad del aceite, se deben manipular la presión y la temperatura. Entonces para un flujo de 4500 kg/h el programa da como resultado que para una presión establecida de 3,60 mbar la temperatura de operación debe ser de 251,2 ° C. Ahora si se disminuye la producción operando a un flujo de 3500 kg/h de aceite y a la misma presión, la temperatura requerida para el proceso es de 247 °C, el cambio de temperatura no es muy grande por que se puede trabajar con ese flujo de vapor sin necesidad de disminuir la producción de aceite refinado.

Si lo que se quiere es operar a una temperatura de 269,3 °C, el mismo aceite y con la misma cantidad de vapor entonces la presión de operación deberá ser de 7,90 mbar para procesar un flujo de aceite de 4500 kg/h, disminuyendo el flujo a 3500 kg/h la presión de operación será de 9,45 mbar, es decir, que no valdría la pena sacrificar la producción de aceite refinado ya que a mayor flujo de aceite se requiere una menor presión de operación del sistema. Convendría más disminuir un poco la temperatura para operar a una presión baja y sin disminuir la producción del aceite.

6. CONCLUSIONES

Una vez concluido este trabajo especial de grado se establecen como conclusiones las siguientes.

- ✓ El programa que simula el proceso de desodorización de aceite de maíz es una herramienta útil para evaluar la temperatura de operación a una presión del sistema dada así como también para el porcentaje de acidez final.
- ✓ La desviación presentada al determinar tanto la temperatura del sistema como la acidez final es baja.
- ✓ El programa permite establecer la influencia que tienen las variables del proceso sobre el porcentaje de acidez.
- ✓ Con el programa se puede evaluar qué variable (presión, temperatura o flujo de aceite) conviene manipular a la hora de haber una falla en el suministro de vapor de arrastre para el proceso.

7. RECOMENDACIONES

A continuación se plantean una serie de recomendaciones que servirán a futuros proyectos que se desarrollen a partir de este.

- Proporcionar más datos específicos del equipo a simular, ya que esto facilitaría y ampliaría los conocimientos básicos para llevar a cabo la simulación del proceso.
- Buscar la manera de instalar medidores de presión en cada etapa del equipo para tener los datos correctos de este parámetro.
- Ampliar el algoritmo del programa que permita evaluar otros parámetros de calidad exigidos por las normas, como lo es, por ejemplo, el porcentaje de humedad.
- Desarrollar la posibilidad de incluir en el programa la determinación del color del aceite, cuantificando las sustancias que suministran esta propiedad al aceite.

8. BIBLIOGRAFÍA

- BAILEY, A.E. “*Aceites y grasas industriales*”. Editorial. Reverté. España.1967.
- BALCHEN, Steen. “*Principios de Desodorización*”. Aceites y Grasas (37). 1999.
- Campro Internacional Inc. “*Sistema de Desodorización en capa delgada*”. Aceites y Grasas (31). 1998.
- CARLSON, K. “*Desodorización: opciones y tendencias*”. Aceites y Grasas (28). 1994.
- ERICKSON, W. “*Fatty acids synthesis and applications*”.NDC, Nueva Jersey. 1980.
- FOSCARINI, Rubén. “*Desodorización de Aceites Vegetales*” . Aceites y Grasas (27). 1994.
- Manual de Laboratorio de Aceites. Laboratorio Central. Remavenca, Turmero, 2000.
- Normas COVENIN 743:2000.
- POTTER, N. “*La Ciencia de los Alimentos*”. Edutex. México. 1972.
- Proceso de REMAVENCA.
- STRECKER, L. “*Aceite de Maíz. Antecedentes, composición, procesamiento, refinación, utilización y aspectos nutricionales*”. Aceites y Grasas (29), 1997.
- ZILLER, Steve. “*Grasas y Aceites Alimentarios*”. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 1996.

9. APÉNDICES

9.1. APENDICE A: Valores del Proceso Industrial

Tabla N° 7: Datos del proceso industrial

Flujo de Aceite L'(kg/h)	Ac Inicial wo (%)	Ac Final w4 (%)	P (mbar)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
4000	1,42	0,05	4,25	268,7	266,1	264,3	260,4
4000	1,55	0,05	3,60	269,4	266,7	264,7	260,6
4200	1,91	0,05	3,45	271,7	270,4	267,8	263,5
4200	1,19	0,05	4,65	274,2	270,2	268,5	264,1
4357	0,75	0,05	4,60	266,3	265,1	264,9	260,8
4400	1,59	0,05	3,65	269,5	267,6	265,3	261,1
4400	2,07	0,05	2,95	272,1	268,3	266,1	261,4
4400	1,80	0,05	3,00	270,8	267,1	264,8	260,9
4400	1,13	0,05	3,95	269,8	267,6	266,2	262,0
4400	0,48	0,05	6,45	269,0	268,1	266,0	262,0
4400	0,70	0,05	5,00	269,3	267,1	265,2	260,4
4400	1,12	0,04	2,70	264,3	262,3	260,5	256,4
4400	1,20	0,04	3,22	270,9	267,8	264,6	256,8
4400	0,92	0,04	4,01	269,9	267,6	266,7	263,3
4400	1,47	0,05	3,75	273,5	269,1	267,2	262,8
4400	1,39	0,05	3,65	271,3	267,5	266,0	262,8
4400	1,06	0,05	3,72	268,8	265,6	263,2	258,9
4500	1,13	0,05	3,50	269,3	265,3	263,0	259,3
4500	1,55	0,05	3,65	268,7	267,7	266,3	262,1
4500	1,84	0,05	2,58	267,0	264,5	263,3	260,2
4500	2,15	0,05	2,65	268,5	268,2	266,1	261,9
4500	1,75	0,05	3,01	270,8	267,2	265,6	261,7
4500	1,77	0,05	3,45	270,9	267,8	265,7	261,5
4500	1,13	0,05	4,25	269,5	267,1	265,0	261,1
4500	0,99	0,05	4,30	272,2	268,0	266,2	262,0
4500	0,62	0,05	5,35	268,7	267,7	265,9	261,9
4500	0,64	0,05	5,35	271,0	267,3	265,6	261,3
4500	0,84	0,04	4,45	269,9	266,9	265,3	261,1
4500	1,75	0,05	3,05	269,4	264,7	261,7	258,6
4500	1,63	0,04	2,73	270,5	266,9	265,1	260,8
4500	1,06	0,05	3,85	270,0	266,4	264,8	260,6
4500	0,83	0,04	4,00	270,9	266,9	265,1	260,9
4500	0,92	0,04	3,29	264,8	263,8	263,6	260,5

Tabla N° 7: Datos del proceso industrial (Continuación)

Flujo de Aceite L'(kg/h)	Ac Inicial w _o (%)	Ac Final w ₄ (%)	P (mbar)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
4500	1,15	0,04	2,68	266,1	262,4	260,6	256,6
4500	0,95	0,05	3,65	265,5	264,1	262,5	260,7
4500	1,10	0,05	4,05	272,6	268,5	266,2	260,1
4500	1,46	0,05	3,06	272,2	265,5	261,3	257,2
4500	1,21	0,05	3,17	269,3	262,3	260,6	258,6
4600	1,86	0,05	3,23	271,5	267,1	265,0	260,6
4600	1,19	0,05	3,46	267,6	263,3	261,2	257,6
4600	1,16	0,05	3,60	269,8	266,9	265,5	261,4
4600	2,09	0,05	2,66	269,5	267,9	266,5	262,5
4600	0,76	0,05	4,55	267,9	266,2	265,6	263,4
4600	0,69	0,04	4,30	269,5	267,4	265,6	261,5
4700	1,94	0,05	2,46	268,6	265,8	263,9	260,3
4800	1,02	0,04	3,30	270,4	267,3	265,7	261,5
4800	1,75	0,05	3,15	270,4	267,7	265,6	261,3
4800	1,25	0,04	3,00	270,9	267,2	265,7	261,8
4800	1,87	0,05	2,45	268,7	266,1	264,1	260,1
5100	1,41	0,04	2,53	266,7	264,5	263,1	259,6

Tabla N° 8: Características del vapor de inyección y Tamaño de la placa de orificio

Temperatura (°C)	140			
Densidad (kgm ³)	1,967			
Presión de Saturación (bar)	3,61			
Presión de Inyección (bar)	Operación		Diseño	
	1; 1; 1; 2		1,3; 1,5; 1,7; 2	
Diámetro la Placa de Orificio (mm)	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV
	3,5	4,5	6,0	7,0

9.2. APENDICE B: Cálculos Tipos

Para alcanzar los objetivos del trabajo es necesario aplicar una serie de ecuaciones en las que se encuentran involucradas cada una de las variables que se obtuvieron experimentalmente. A continuación se presenta un esquema de los cálculos a seguir para el reporte de los resultados obtenidos:

Vapor Requerido para la Desodorización.

Para estimar el vapor de agua necesario para el proceso se tomará en cuenta las placas de orificio que existen en cada una de las etapas del equipo.

El vapor se determinará a través de la ecuación característica de la placa y es la que se muestra a continuación.

$$V_{m\acute{a}sico} = Y * C * A_o * \sqrt{\Delta P * \rho} \quad (B.1)$$

llevando la ecuación anterior a base molar

$$V_{molar} = \frac{1,265 * Y * C * d_i^2 * \sqrt{\Delta P * \rho}}{PM_{vapor}} \quad (B.2)$$

donde:

$V_{m\acute{a}sico}$: Flujo másico de vapor (kg/h), reportado en la tabla N° 10

V_{molar} : Flujo másico de vapor (kg/h), reportado en la tabla N° 10

Y: Factor Neto de Expansión (adim).

C: Coeficiente de flujo C (adim).

d_i : Diámetro de la placa de orificio (mm), tomado en la tabla N° 8

ΔP : Caída de presión en la placa de orificio (bar), tomado en la tabla N° 8

ρ : Densidad del vapor (kg/m³), tomado en la tabla N° 8

El coeficiente de flujo C depende del número de Reynolds y de la relación entre el diámetro de la placa de orificio y el diámetro de la tubería de alimentación del vapor y se determina con el gráfico mostrado al final de este apéndice.

El factor neto de expansión Y, depende de la relación entre la caída de presión y la presión a la entrada de la placa de orificio, así como también de la relación de los diámetros mencionada anteriormente. Este factor se estima a través del grafico N° B.2 de éste apéndice

$$\beta = \frac{d_1}{d_2} = \frac{3,5mm}{15,8mm} = 0,22 \approx 0,20$$

donde:

β : Relación de Diámetros (adim), reportado en la tabla N° 9

d_1 : Diámetro de la placa de orificio (mm), tomado en la tabla N° 8

d_2 : Diámetro de la tubería de alimentación del vapor de arrastre (mm)

$$Re = \frac{u * d_2 * \rho}{\mu} = \frac{30m/s * 15,8 * 10^{-3} * 1,967kg/m^3}{1,36466 * 10^{-5}} = 6,8 * 10^4$$

La velocidad del vapor esta entre 30 y 50 m/s, sin embargo a partir del Re anterior C es constante

$$C = 0,5974$$

$$\frac{\Delta P}{p_1} = \frac{1bar}{3,61bar} = 0,227$$

$$Y = 0,9503$$

$$V_{molar} = \frac{1,265 * 0,9503 * 0,5974 * 3,5^2 * \sqrt{1 * 1,9675}}{18} = 0,68 \frac{kmol}{h}$$

De la misma forma se calcula el vapor en las demás etapas, estos resultados están reportados en la tabla N° 10, para cada condición de inyección de vapor de arrastre.

Gráfico B.1.: Coeficiente de flujo C

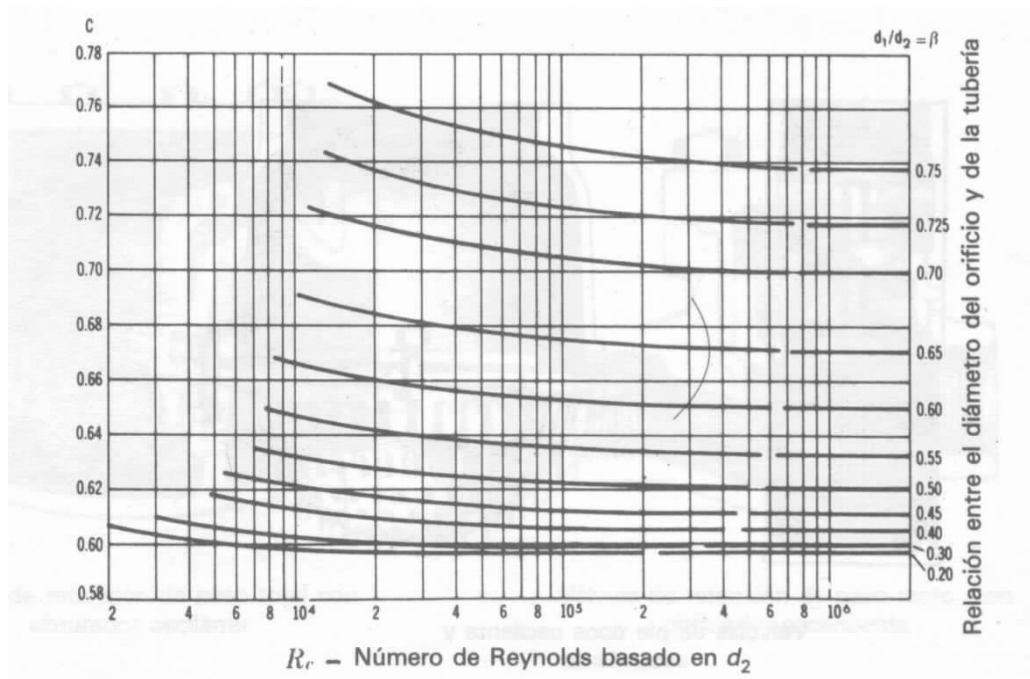
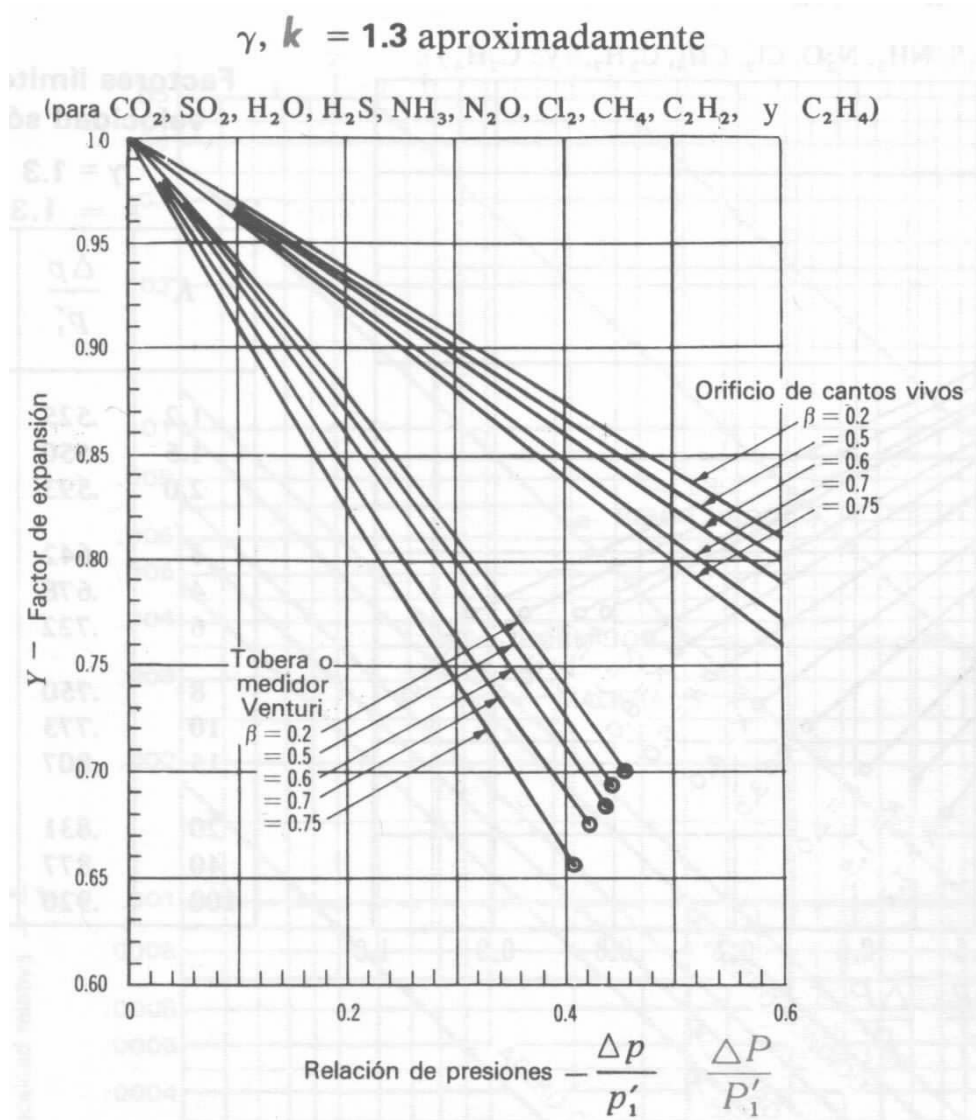
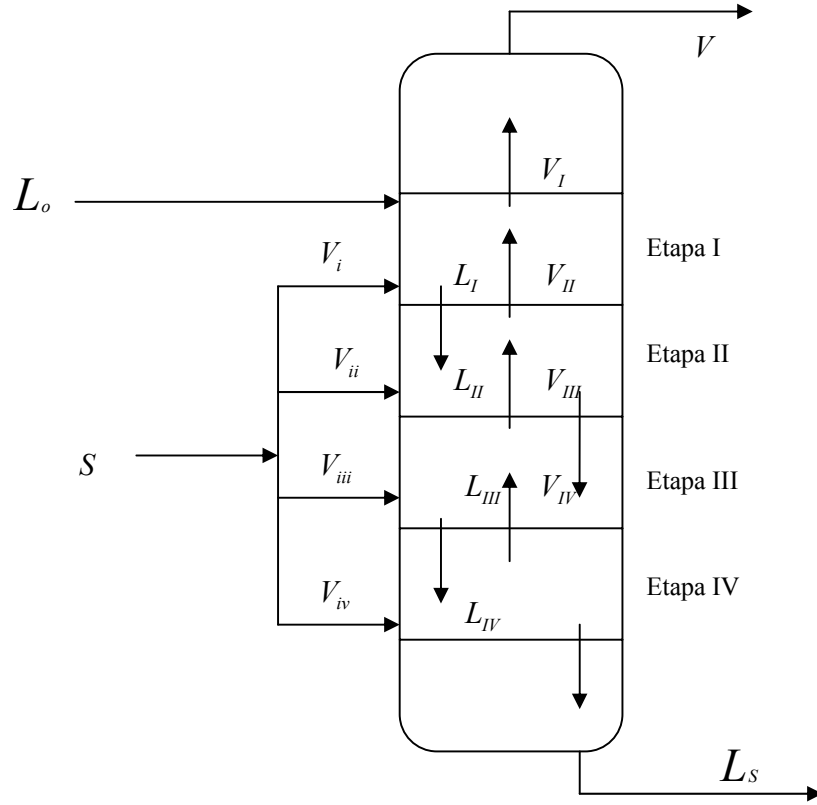


Gráfico B.2.: Factor Neto de Expansión Y



Balance de Masa



1. Balance por componente, siendo el componente de interés el ácido oleico, haciendo el balance de abajo hacia arriba

Etapa IV:
$$x_{AIII} * L_{III} = x_{AS} * L_{IV} + y_{AIV} * V_{IV} \quad (B.3)$$

Etapa III:
$$x_{AII} * L_{II} + y_{AIV} * V_{IV} = x_{AIII} * L_{III} + y_{AIII} * V_{III} \quad (B.4)$$

Etapa II:
$$x_{AI} * L_I + y_{AIII} * V_{III} = x_{AII} * L_{II} + y_{AII} * V_{II} \quad (B.5)$$

Etapa I:
$$x_{Ao} * L_o + y_{AII} * V_{II} = x_{AI} * L_I + y_{AI} * V_I \quad (B.6)$$

-
-
- ✓ Tomando en cuenta que el sistema tiene un comportamiento ideal, se tiene:

$$y_{Aj} = \frac{x_{Aj} * P_A^o(T_j)}{P_j} \quad (B.7)$$

donde $j = 1, 2, 3, 4$.

- ✓ Suponiendo que la cantidad de aceite no se altera significativamente, se tiene:

$$L_o = L_I = L_{II} = L_{III} = L_{IV} = L_S = L \quad (B.8)$$

- ✓ Sustituyendo las ecuaciones (B.5) y (B.6) en la ecuaciones anteriores queda:

$$x_{AIII} * L = x_{IV} * L + \frac{x_{AIV} * P_A^o(T_{IV})}{P_{IV}} * V_{IV} \quad (B.9)$$

$$x_{AII} * L_{II} + \frac{x_{AIV} * P_A^o(T_{IV})}{P_{IV}} * V_{IV} = x_{AIII} * L + \frac{x_{AIII} * P_A^o(T_{III})}{P_{III}} * V_{III} \quad (B.10)$$

$$x_{AI} * L + \frac{x_{AIII} * P_A^o(T_{III})}{P_{III}} * V_{III} + \frac{x_{AIV} * P_A^o(T_{IV})}{P_{IV}} * V_{IV} = x_{AII} * L + \frac{x_{AII} * P_A^o(T_{II})}{P_{II}} * V_{II} \quad (B.11)$$

$$x_{Ao} * L + \frac{x_{AII} * P_A^o(T_{II})}{P_{II}} * V_{II} + \frac{x_{AIII} * P_A^o(T_{III})}{P_{III}} * V_{III} + \frac{x_{AIV} * P_A^o(T_{IV})}{P_{IV}} * V_{IV} =$$

$$x_{AI} * L + \frac{x_{AI} * P_A^o(T_I)}{P_I} * V_I \quad (B.12)$$

donde:

L: Flujo molar de Aceite (kmol/h), tomado de la tabla N° 11

X_{Ai} : Composiciones molares de salida de las etapas 1, 2 y 3 (adim), reportado en la tabla N° 12

X_{Ao} y X_{AIV} : Composiciones molares de entrada y salida, respectivamente, al proceso (adim), tomado de la tabla N° 11

$P_i (T_i)$: Presión de Vapor del ácido graso a la temperatura de la etapa i (i = 1, 2, 3 y 4) (mbar), tomado de la tabla N° 13

P_i : Presión de la etapa i (mbar), tomado de la tabla N° 13

V_i : Vapor de arrastre de la etapa i (kmol/h), tomado de la tabla N° 10

- ✓ Tomando la presión entre las etapas calculadas con la siguiente relación.

$$P_i = V_i * \frac{P_1}{V_1} \quad (B.13)$$

$$P_i = 1,09 * \frac{3,40}{0,68} = 5,615 \text{ mbar}$$

- ✓ Conversión de Composición másica a Composición molar.

$$x_A = \frac{w_A / 282}{w_A / 282 + (100 - w_A) / 890} \quad (B.14)$$

donde

w_A : Porcentaje de Acidez, base másica (%), tomado de la tabla N° 7

x_A : Composición molar (adim), reportado de la tabla N° 11 y 12

$$x_{Ao} = \frac{1,13 / 282}{1,13 / 282 + (100 - 1,13) / 890} = 3,48 * 10^{-2}$$

$$x_{Ao} = \frac{0,05 / 282}{0,05 / 282 + (100 - 0,05) / 890} = 1,58 * 10^{-3}$$

✓ Conversión de Flujo másico a Flujo molar.

$$L = \frac{w_A * L'}{100 * 282} + \frac{(100 - w_A) * L'}{100 * 890} \quad (\text{B.15})$$

donde:

L': Flujo Másico de Aceite (kg/h), tomado de la tabla N° 11

$$L = \frac{1,13 * 4500}{100 * 282} + \frac{(100 - 1,13) * 4500}{100 * 890} = 5,179 \frac{kmol}{h}$$

$$x_{AIII} = \frac{1,58 * 10^{-3} * 5,179 + \frac{1,58 * 10^{-3} * 35,66}{46,79} * 6,85}{5,179} = 3,30 * 10^{-3}$$

$$x_{AII} = \frac{3,30 * 10^{-3} * 5,179 + \frac{3,30 * 10^{-3} * 44,31}{13,79} * 1,96 - \frac{1,58 * 10^{-3} * 35,66}{46,79} * 6,85}{5,179} = 7,43 * 10^{-3}$$

$$x_{AI} = \frac{7,43 * 10^{-3} * 5,179 + \frac{7,43 * 10^{-3} * 48,18}{7,46} * 1,09 - \frac{3,30 * 10^{-3} * 44,31}{13,79} * 1,96 - \frac{1,58 * 10^{-3} * 35,66}{46,79} * 6,85}{5,179}$$

$$x_{AI} = 1,76 * 10^{-2}$$

Balance de Energía

Balance por etapas:

$$Q_{reh} + h_i * V_i + h_0 * L + h_{V_{II}} * V_{II} = h_I * L + h_{V_I} * V_I \quad (B.16)$$

$$h_{ii} * V_{ii} + h_I * L + h_{V_{III}} * V_{III} = h_{II} * L + h_{V_{II}} * V_{II} \quad (B.17)$$

$$h_{iii} * V_{iii} + h_{II} * L + h_{V_{IV}} * V_{IV} = h_{III} * L + h_{V_{III}} * V_{III} \quad (B.18)$$

$$h_{iv} * V_{iv} + h_{III} * L = h_{IV} * L + h_{V_{IV}} * V_{IV} \quad (B.20)$$

$$h_i = h_{ii} = h_{iii} = h_{iv} = h \quad (B.21)$$

$$h_{V_I} = h_{V_{II}} = h_{V_{III}} = h_{V_{IV}} = h_V \quad (B.22)$$

$$h_I - h_0 = Cp * (T_1 - T_0) \quad (B.23)$$

$$h_{II} - h_I = Cp * (T_2 - T_1) \quad (B.24)$$

$$h_{III} - h_{II} = Cp * (T_3 - T_2) \quad (B.25)$$

$$h_{IV} - h_{III} = Cp * (T_4 - T_3) \quad (B.26)$$

Calculo de las Temperaturas:

$$T_3 = \frac{(h_V - h) * V_{iv}}{L * Cp} + T_4 \quad (B.27)$$

$$T_2 = \frac{(h_V - h) * V_{iii}}{L * Cp} + T_3 \quad (B.28)$$

$$T_1 = \frac{(h_V - h) * V_{ii}}{L * Cp} + T_2 \quad (B.29)$$

$$T_3 = \frac{(3010 - 2733) * 123,31}{4500 * 1,9} + 259,0 = 263,0$$

$$T_2 = \frac{(3010 - 2733) * 35,22}{4500 * 1,4} + 263,0 = 264,5$$

$$T_1 = \frac{(3010 - 2733) * 19,65}{4500 * 2,5} + 264,5 = 267,6$$

9.3. APENDICE C: Resultados Intermedios.

Tabla N° 9: Relación de Diámetros

Etapas	Relación de Diámetros (adim)
I	0,20
II	0,30
III	0,40
IV	0,45

Tabla N° 10 Flujo de Vapor

Presión (bar)	Etapas			
	Vi (kg/h)	Vii (kg/h)	Viii (kg/h)	Viv (kg/h)
Operación	11,86	19,65	35,22	123,31
Diseño	13,13	22,88	42,69	123,31
	Vi (kmol/h)	Vii (kmol/h)	Viii (kmol/h)	Viv (kmol/h)
Operación	0,66	1,09	1,96	6,85
Diseño	0,73	1,27	2,37	6,85

Tabla N° 11 Flujo Molar y Compasiones de Entrada y Salida del Proceso

Flujo de Aceite L (kmol/h)	xo (adim)	x4 (adim)	Flujo de Aceite L (kmol/h)	xo (adim)	x4 (adim)
4,632	4,35E-02	1,58E-03	5,124	1,93E-02	1,58E-03
4,645	4,73E-02	1,58E-03	5,126	1,99E-02	1,58E-03
4,913	5,79E-02	1,58E-03	5,148	2,60E-02	1,26E-03
4,840	3,66E-02	1,58E-03	5,247	5,32E-02	1,58E-03
4,975	2,33E-02	1,58E-03	5,234	4,97E-02	1,26E-03
5,113	4,85E-02	1,58E-03	5,172	3,27E-02	1,58E-03
5,164	6,25E-02	1,58E-03	5,147	2,57E-02	1,26E-03
5,136	5,47E-02	1,58E-03	5,156	2,85E-02	1,26E-03
5,064	3,48E-02	1,58E-03	5,182	3,54E-02	1,26E-03
4,995	1,50E-02	1,58E-03	5,160	2,94E-02	1,58E-03
5,018	2,18E-02	1,58E-03	5,176	3,39E-02	1,58E-03
5,063	3,45E-02	1,26E-03	5,215	4,47E-02	1,58E-03
5,072	3,69E-02	1,26E-03	5,188	3,72E-02	1,58E-03
5,042	2,85E-02	1,26E-03	5,376	5,64E-02	1,58E-03
5,101	4,50E-02	1,58E-03	5,301	3,66E-02	1,58E-03
5,092	4,26E-02	1,58E-03	5,298	3,57E-02	1,58E-03
5,057	3,27E-02	1,58E-03	5,401	6,31E-02	1,58E-03
5,179	3,48E-02	1,58E-03	5,253	2,36E-02	1,58E-03
5,225	4,73E-02	1,58E-03	5,245	2,15E-02	1,26E-03
5,257	5,59E-02	1,58E-03	5,502	5,88E-02	1,58E-03
5,291	6,48E-02	1,58E-03	5,512	3,15E-02	1,26E-03
5,247	5,32E-02	1,58E-03	5,597	5,32E-02	1,58E-03
5,249	5,38E-02	1,58E-03	5,539	3,84E-02	1,26E-03
5,179	3,48E-02	1,58E-03	5,611	5,67E-02	1,58E-03
5,164	3,06E-02	1,58E-03	5,905	4,32E-02	1,26E-03

Tabla N° 12: Composiciones de las etapas 1, 2 y 3.

x1 (adim)	x2 (adim)	x3 (adim)	x1 (adim)	x2 (adim)	x3 (adim)
1,75E-02	7,45E-03	3,30E-03	1,21E-02	5,86E-03	2,93E-03
2,23E-02	8,71E-03	3,55E-03	1,18E-02	5,77E-03	2,90E-03
2,64E-02	9,63E-03	3,72E-03	1,37E-02	5,89E-03	2,62E-03
1,83E-02	7,66E-03	3,33E-03	2,32E-02	8,86E-03	3,61E-03
1,40E-02	6,58E-03	3,10E-03	2,14E-02	7,85E-03	3,00E-03
2,31E-02	8,86E-03	3,57E-03	1,69E-02	7,30E-03	3,26E-03
2,64E-02	9,64E-03	3,70E-03	1,33E-02	5,75E-03	2,59E-03
2,43E-02	9,19E-03	3,65E-03	1,54E-02	6,53E-03	2,78E-03
1,84E-02	7,72E-03	3,35E-03	1,67E-02	6,69E-03	2,78E-03
1,01E-02	5,19E-03	2,77E-03	1,66E-02	7,33E-03	3,34E-03
1,29E-02	6,08E-03	2,97E-03	1,68E-02	7,12E-03	3,16E-03
1,71E-02	6,78E-03	2,80E-03	1,92E-02	7,64E-03	3,33E-03
1,69E-02	6,43E-03	2,63E-03	1,75E-02	7,57E-03	3,38E-03
1,50E-02	6,35E-03	2,74E-03	2,43E-02	9,17E-03	3,63E-03
2,08E-02	8,32E-03	3,46E-03	1,81E-02	7,62E-03	3,34E-03
2,04E-02	8,33E-03	3,51E-03	1,85E-02	7,76E-03	3,36E-03
1,69E-02	7,22E-03	3,23E-03	2,86E-02	1,03E-02	3,86E-03
1,76E-02	7,43E-03	3,30E-03	1,42E-02	6,68E-03	3,18E-03
2,32E-02	9,01E-03	3,61E-03	1,21E-02	5,42E-03	2,51E-03
2,56E-02	9,71E-03	3,78E-03	2,63E-02	9,73E-03	3,77E-03
2,94E-02	1,04E-02	3,87E-03	1,57E-02	6,44E-03	2,73E-03
2,42E-02	9,25E-03	3,66E-03	2,44E-02	9,20E-03	3,64E-03
2,43E-02	9,20E-03	3,64E-03	1,77E-02	7,00E-03	2,85E-03
1,80E-02	7,57E-03	3,32E-03	2,57E-02	9,54E-03	3,71E-03
1,60E-02	7,03E-03	3,20E-03	2,01E-02	7,64E-03	2,99E-03

Tabla N° 13: Presión de cada etapa

P1 (mbar)	P2 (mbar)	P3 (mbar)	P4 (mbar)	P1 (mbar)	P2 (mbar)	P3 (mbar)	P4 (mbar)
5,25	8,70	15,59	54,58	6,35	10,52	18,85	66,02
4,60	7,62	13,66	47,83	6,35	10,52	18,85	66,02
4,45	7,37	13,21	46,27	5,45	9,03	16,16	51,18
5,65	9,36	16,78	58,74	4,05	6,71	12,01	38,04
5,60	9,28	16,63	58,22	3,73	6,18	11,07	38,78
4,65	8,10	15,12	43,67	4,85	8,04	14,40	50,43
3,95	6,54	11,73	41,07	5,00	8,28	14,85	51,98
4,00	6,63	11,88	41,59	4,29	7,11	12,74	44,60
4,95	8,20	14,70	51,47	3,68	6,10	10,93	38,26
7,45	12,34	22,12	77,46	4,65	7,70	13,81	48,35
6,00	9,94	17,81	62,38	5,05	8,37	14,99	52,50
3,70	6,13	10,99	38,47	4,06	6,73	12,05	42,21
4,22	6,99	12,53	43,88	4,17	6,91	12,38	43,36
5,01	8,30	14,88	52,09	4,23	7,37	13,75	39,73
4,75	7,87	14,10	49,39	4,46	7,77	14,50	41,89
4,65	7,70	13,81	48,35	4,60	7,62	13,66	47,83
4,72	7,82	14,01	49,07	3,66	6,06	10,87	38,05
4,50	7,46	13,36	46,79	5,55	9,20	16,48	57,70
4,65	8,10	15,12	43,67	5,30	8,78	15,74	55,10
3,58	5,93	10,63	37,22	3,46	5,73	10,27	35,97
3,65	6,05	10,84	37,95	4,30	7,12	12,77	44,71
4,01	6,64	11,91	41,69	4,15	7,23	13,49	38,97
4,45	7,76	14,47	41,79	4,00	6,63	11,88	41,59
5,25	9,15	17,07	49,31	3,45	5,72	10,24	35,87
5,30	8,78	15,74	55,10	3,53	6,15	11,48	33,15

Tabla N° 14: Presión de Vapor de cada etapa

Pv1 (mbar)	Pv2 (mbar)	Pv3 (mbar)	Pv4 (mbar)	Pv1 (mbar)	Pv2 (mbar)	Pv3 (mbar)	Pv4 (mbar)
54,47	49,60	46,46	40,27	54,47	52,55	49,24	42,56
55,85	50,69	47,14	40,57	59,13	51,80	48,71	41,63
60,62	57,88	52,74	45,13	56,86	51,06	48,18	41,32
66,21	57,47	54,08	46,13	55,85	47,14	42,24	37,67
49,96	47,83	47,49	40,87	58,09	51,06	47,83	40,87
56,05	52,36	48,18	41,32	57,06	50,14	47,32	40,57
61,48	53,69	49,60	41,78	58,92	51,06	47,83	41,02
58,71	51,42	47,32	41,02	47,32	45,62	45,29	40,42
56,65	52,36	49,78	42,71	49,60	43,35	40,57	34,96
55,06	53,31	49,42	42,71	48,53	46,13	43,50	40,72
55,65	51,42	48,01	40,27	62,58	54,08	49,78	39,82
46,46	43,19	40,42	34,69	61,70	48,53	41,63	35,75
58,92	52,74	46,97	35,22	55,65	43,19	40,57	37,67
56,86	52,36	50,69	44,80	60,19	51,42	47,66	40,57
64,60	55,26	51,61	43,99	52,36	44,80	41,47	36,29
59,76	52,17	49,42	43,99	56,65	51,06	48,53	41,78
54,66	48,71	44,63	38,09	56,05	52,93	50,32	43,50
55,65	48,18	44,31	38,66	52,93	49,78	48,71	44,96
54,47	52,55	49,96	42,87	56,05	51,98	48,71	41,94
51,24	46,80	44,80	39,97	54,27	49,06	45,79	40,12
54,08	53,50	49,60	42,56	57,88	51,80	48,89	41,94
58,71	51,61	48,71	42,24	57,88	52,55	48,71	41,63
58,92	52,74	48,89	41,94	58,92	51,61	48,89	42,40
56,05	51,42	47,66	41,32	54,47	49,60	46,13	39,82
61,70	53,12	49,78	42,71	50,69	46,80	44,47	39,09