



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

**OBTENCIÓN DE UNA BASE PARA MARGARINA LIBRE DE
ISÓMEROS TRANS A PARTIR DEL FRACCIONAMIENTO DE
ACEITE DE PALMA AFRICANA**

Oliver Alejandro Lima Montenegro

Asesorado por Ing. Ronal Adolfo Herrera Orozco

Guatemala, marzo de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OBTENCIÓN DE UNA BASE PARA MARGARINA LIBRE DE
ISÓMEROS TRANS A PARTIR DEL FRACCIONAMIENTO DE
ACEITE DE PALMA AFRICANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

OLIVER ALEJANDRO LIMA MONTENEGRO

ASESORADO POR EL ING. RONAL A. HERRERA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Ing. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Williams G. Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Jorge García
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

OBTENCIÓN DE UNA BASE PARA MARGARINA LIBRE DE ISÓMEROS TRANS A PARTIR DEL FRACCIONAMIENTO DE ACEITE DE PALMA AFRICANA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 17 de octubre de 2005.

Oliver Alejandro Lima Montenegro

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que de manera especial colaboraron en la realización del trabajo de graduación, en particular a:

Ing. Ronal Adolfo Herrera Orozco

Ing. Williams G. Álvarez Mejía

Personal de Fraccionador, propietarios y personal de empresa Olmeca S.A.

DEDICATORIA A:

- DIOS** Todo poderoso.
- MIS PADRES** Saúl Adolfo Lima Leiva y Patricia Elizabeth Montenegro de Lima, por darme la vida, haber formado la persona que soy, darme todo el amor que necesita un hijo y enseñarme día a día a seguir adelante con pasos firmes.
- MIS HERMANOS** Daniel Renato y Norman Oswaldo, con mucho cariño.
- MI NOVIA** Lidia Carolina Chiroy Antillón, por su apoyo, cariño y comprensión.
- AMIGOS** Por su apoyo y buenos deseos siempre.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
HIPÓTESIS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Aceites y grasas	5
2.1.1 Ácidos grasos	5
2.1.2 Triglicéridos	6
2.1.3 Isómeros	7
2.1.4 Margarina	8
2.1.5 Mantequilla	9
2.1.6 Aceite de palma africana	10
2.1.6.1 Generalidades	10
2.1.6.2 Composición del aceite de palma africana	11
2.1.7 Proceso tradicional de producción de margarina	12
2.1.7.1 Hidrogenación	12
2.1.7.2 Catalizadores para hidrogenación	14
2.1.7.3 Efecto de las variables en la hidrogenación	15
2.1.8 Terminado de la margarina	17
2.2 Fraccionamiento	17

2.2.1	Generalidades	17
2.2.2	Cristalizadores industriales	18
2.2.3	Curvas de enfriamiento	20
2.2.4	Diferentes tipos de procesos de fraccionamiento	21
2.2.4.1	Fraccionamiento en mezcla con disolvente	21
2.2.4.2	Fraccionamiento en fase acuosa con detergente y electrolito	22
2.2.4.3	Fraccionamiento en fase oleica o fraccionamiento en seco	23
2.2.5	Separación de cristales del aceite líquido	23
2.2.6	Enucleación homogénea	25
2.2.7	Enucleación heterogénea	26
2.2.8	Enucleación secundaria	26
2.2.9	Enucleación por contacto	26
2.2.10	Crecimiento de cristales	27
2.2.11	Principales formas cristalinas de un triglicérido	28
3.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	29
3.1	Unidad de cristalización	29
3.2	Enfriador de agua	30
3.3	Filtro prensa de membranas	31
4.	DESARROLLO DEL EXPERIMENTO	33
4.1	Fase teórica	33
4.2	Diseño del experimento	39
4.3	Metodología	41
5.	RESULTADOS	47
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
7.	CONCLUSIONES	57
8.	RECOMENDACIONES	59
9.	BIBLIOGRAFÍA	61

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

63

ANEXOS

65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Curvas de enfriamiento típicas	19
2	Unidades de cristalización	28
3	Filtro prensa de membranas	29
4	Placas de membranas	30
5	Fracciones del aceite de palma africana	32
6	Fracciones de la oleína de palma africana	32
7	Fracciones de la estearina de palma africana	33
8	Camino de fraccionamiento proceso 2F	34
9	Camino de fraccionamiento proceso 3F	35
10	Curvas de enfriamiento óptimas	46
11	Esquema de la planta de fraccionamiento industrial	62

TABLAS

I	Composición de ácidos grasos de la palma africana	10
II	Parámetros del contenido de grasa sólida (NMR)	36
III	Parámetros de los análisis fisicoquímicos (AOCS)	36
IV	Perfil cromatográfico de una base para margarina hidrogenada	37
V	Curvas de enfriamiento para la obtención del sustituto 3F, a partir de la oleína dura PF: 33°C	38
VI	Curvas de enfriamiento para la obtención del sustituto 2F, a partir de la estearina PF: 49°C	38
VII	Tiempos de retención de ácidos grasos	40
VIII	Contenido de grasa sólida de los sustitutos (NMR)	45
IX	Análisis fisicoquímicos (AOCS) de los sustitutos	45
X	Perfil cromatográfico de la prueba 4 del proceso 2F	46
XI	Rendimientos experimentales	47

LISTA DE SÍMBOLOS

2F	Proceso de dos fraccionamientos
3F	Proceso de tres fraccionamientos
PF	Punto de fusión
IY	Índice de yodo

GLOSARIO

Cristalizadores	Tubos cilíndricos donde se lleva a cabo la curva de enfriamiento, controlada para el proceso de cristalización del aceite de palma R.B.D.
Cromatografía de gas	Metodología de análisis basada en vaporización de muestras a temperaturas altas y transportadas mediante un gas inerte, a través de columnas que contienen materias absorbentes de sólidos. Los componentes de la mezcla son retenidos por el absorbente, a grados variables que dependen del grado de afinidad química que hay entre ellos. La separación resultante permite una determinación muy precisa de la composición.
Estabilidad	Resistencia relativa de un producto ante una descomposición o cambio indeseable, generalmente se refiere a la oxidación, hidrólisis, reversión de sabor y olor.
Estearina de palma	Fracción sólida del aceite de palma R.B.D.
Filtro de membranas	Es el que se utiliza para obtener la separación física de la parte líquida y la parte sólida del aceite de palma R.B.D. a una presión de nueve bares.

Fraccionamiento	Proceso de enfriamiento controlado de aceite de palma R.B.D., con el objetivo de separar la parte líquida (oleína) de la parte dura (estearina) por medio de filtración.
Índice de refracción	Es la expresión numérica de la proporción de la velocidad de la luz, dentro de un vacío, por la velocidad de la luz en una sustancia de prueba. Está relacionado con el grado de saturación y es afectado por otros factores, como el ácido graso libre, la oxidación y el tratamiento con calor.
Instauración	Escasez de átomos de hidrógeno en la estructura molecular del aceite; a menor contenido de hidrógeno, mayor será el grado de insaturación y mayor la reactividad al oxígeno.
Margarina	Emulsión plástica o líquida que contiene un mínimo de 80% de grasa. La porción líquida consiste de agua y/o productos lácteos. También debe agregársele vitamina A. Otros ingredientes incluyen: sal, colorantes, emulsificantes y conservantes.
Oleína de palma	Es la fracción líquida del aceite de palma R.B.D.
Olor	Reacción sensorial a los vapores que se inhalan, en grasas éste debe ser neutral o blando.
Punto de fusión	Temperatura a la cual se funde una grasa

Refinación	Proceso diseñado para eliminar de manera sustancial los ácidos grasos libres y otras impurezas densas, como los fosfátidos y las sustancias proteínáceas y mucilaginosas.
Sabor	Descripción de la sensación que se produce mediante la prueba de degustación. En un aceite o grasa, siempre es deseable tener un sabor blando o neutral, para que predominen los sabores naturales de los alimentos.
Reversión	Cambio indeseable en el sabor de un aceite o grasa refinada.
Tierra de blanqueo	Tierra activada, tratada con ácido para incrementar la capacidad de adsorción de los pigmentos del aceite.
Triglicérido	Molécula éster química formada por la reacción de una unidad de glicerina con tres de ácido graso.

RESUMEN

Se llevó a cabo el fraccionamiento de aceite de palma africana (*elaeis guineensis*), para obtener un producto graso libre de isómeros trans, que cumpla con las especificaciones (propiedades físicas y químicas) de calidad de una base para margarina hidrogenada, para de esta manera sustituirla. El fraccionamiento se efectuó en una planta de fraccionamiento industrial de una industria de aceites y grasas comestibles.

El sustituto en cuestión se produjo mediante la determinación de una curva de enfriamiento óptima en la unidad de cristalización, que permitiera llegar a un punto adecuado para separar por medio de filtración, los triglicéridos que posean en su estructura los ácidos grasos saturados que cumplan con el propósito. Es decir, que proporcionen al sustituto las características propias (solidez adecuada, estabilidad y untabilidad) de una base para margarina hidrogenada.

Se efectuaron una serie de pruebas que comprendieron dos y tres fraccionamientos, para luego por medio de análisis de laboratorio, comprobar el nivel de saturación, la cantidad de grasa sólida y por último la ausencia de ácidos grasos en su configuración trans. Todos los análisis son propuestos por AOCS (American Oil Chemists' Society) y constituyen la metodología utilizada a nivel mundial.

Luego de haber realizado el proceso de fraccionamiento, se logró obtener dos productos cuyas características fisicoquímicas satisficieron a los requerimientos de calidad de la base margarina hidrogenada.

A partir del proceso de dos fraccionamientos, se produjo una base para margarina suave, teniendo un rendimiento del 25% y un nivel de saturación mayor que la base margarina hidrogenada pero manteniendo aproximadamente la misma cantidad de grasa sólida; y una base para margarina dura a partir del proceso de tres fraccionamientos, la cual tuvo un rendimiento del 14%, cumpliendo con todos los parámetros propios de una base para margarina hidrogenada dura.

El análisis químico por cromatografía comprobó la ausencia de isómeros trans mediante la construcción gráfica de la composición de los ácidos grasos.

OBJETIVOS

General

Contribuir con una herramienta de operación que permita la producción de una base para margarina que carezca de isómeros trans, a partir del fraccionamiento del aceite de palma africana en una planta de fraccionamiento industrial.

Específicos

1. Determinar una curva de enfriamiento óptima para lograr la generación de los núcleos de cristalización adecuados en el aceite de palma africana refinado físicamente, para así extraer los triglicéridos que contengan en su estructura, los ácidos grasos deseados.
2. Estandarizar un proceso de fraccionamiento de aceite de palma africana, para la obtención del sustituto de la base para margarina hidrogenada, por medio de análisis basados en principios físicos y químicos.
3. Comprobar la ausencia de ácidos grasos insaturados en su configuración trans, en la base desarrollada por medio del proceso de fraccionamiento, al comparar su curva de ácidos grasos con la de una base para margarina hidrogenada.
4. Determinar el rendimiento del sustituto en cuestión.

HIPÓTESIS

Hipótesis de Investigación

1. Es posible desarrollar un sustituto de la base hidrogenada para margarina a partir del fraccionamiento del aceite de palma africana, que cumpla con las especificaciones de calidad (propiedades físicas y químicas) en una planta de fraccionamiento industrial.
2. El proceso de fraccionamiento debe proporcionar un producto libre de ácidos grasos en su configuración trans, los cuales se producen en el proceso de hidrogenación.

INTRODUCCIÓN

La margarina es la alternativa a la mantequilla que nace como necesidad de conseguir un producto más barato, más fácil de usar en la cocina, de sabor más suave y que además cuide el colesterol. Tradicionalmente se ha venido elaborando a partir de la hidrogenación de aceites vegetales, que es un proceso industrial que permite convertir un aceite vegetal en una sustancia sólida, estable y untable. La hidrogenación de aceites es el único proceso que permite alterar la estructura química de los ácidos grasos presentes en los triglicéridos que constituyen las unidades básicas de las grasas. La transformación se basa en una saturación de los dobles enlaces carbono-carbono presentes en los ácidos grasos, otorgándoles no sólo una mejor estabilidad, sino propiedades físicas y químicas distintas al aceite o grasa original.

La hidrogenación, por otra parte, cambia la configuración espacial de los enlaces en los que se incorporan átomos de hidrógeno, de modo que si en los ácidos grasos insaturados naturales abundan las formas cis, una vez terminado el proceso, las formas más habituales son las llamadas trans que tienen un enlace extraño. Los isómeros trans son estructuras artificiales que el organismo no reconoce fácilmente, e interfieren con el normal metabolismo lipídico o se acumulan en las células adiposas.

Los procesos de hidrogenación por lotes son, generalmente, controlados por medio de análisis de índice de refracción, índice de yodo o punto de fusión, no obstante, éstos constituyen métodos que no permiten ver de forma intrínseca el comportamiento de los ácidos grasos en la reacción.

El presente estudio propone la obtención de un sustituto de la base para margarina hidrogenada que cumpla con las especificaciones (propiedades físicas y químicas) de calidad de la base en cuestión, a partir de una fracción del aceite de palma extraída en una planta de fraccionamiento. Dicho sustituto debe eliminar en su totalidad a los isómeros trans debido que no sufrirá un proceso de hidrogenación.

El fraccionamiento es un proceso físico de separación por medio de la formación de núcleos de cristalización, los cuales son removidos por filtración. El aceite de palma tiene una gran variedad de ácidos grasos saturados en su conformación, por lo tanto, se determinará una curva de enfriamiento óptima en la unidad de cristalización, que permita llegar a un punto adecuado para extraer los triglicéridos que posean en su estructura los ácidos grasos saturados que cumplan con el propósito.

El aceite de palma utilizado habrá sido previamente refinado físicamente a condiciones normales, eliminando así los factores que puedan causar desviaciones en el proceso de fraccionamiento. El producto en prueba será luego desodorizado, punto de seguimiento únicamente.

El análisis será realizado por medio de cromatografía de gas, análisis de índice de yodo, puntos de fusión y curva de sólidos. Todos los análisis son propuestos por AOCS (American Oil Chemists' Society) y constituyen metodología utilizada a nivel mundial. El análisis químico por cromatografía proporcionará la construcción gráfica que permitirá comparar la cantidad de isómeros trans de la base para margarina, obtenida por medio de hidrogenación, con el sustituto.

Este proceso permitirá producir una base para margarina libre de isómeros trans, la cual será mucho más atractiva para el consumidor, además de eliminar el proceso de hidrogenación que entre otras cosas, tiene un costo elevado y es sumamente peligroso debido al alto grado de inflamabilidad del hidrógeno gaseoso.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Clásicamente los ácidos grasos se han clasificado como saturados, es decir aquellos que no contienen ningún doble enlace en su cadena molecular e insaturados, aquellos que contienen uno o más dobles enlaces en su cadena. Los ácidos grasos saturados se caracterizan por tener una configuración lineal, lo cual permite una mayor compactación o “empaquetamiento” de los mismos y una mayor “rigidez” de los productos naturales que los contienen. El mayor aporte de ácidos grasos en la dieta se lleva a cabo en la forma de triglicéridos. Aquellos triglicéridos que contienen un alto porcentaje de ácidos grasos saturados tienen también altos puntos de fusión y se presentan como productos sólidos a temperatura ambiente. Por otra parte los ácidos grasos insaturados tienen la posibilidad de presentarse en dos configuraciones espaciales diferentes: cis y trans. La mayor parte de los productos consumidos en la dieta humana contienen ácidos grasos en su configuración cis, aunque productos de origen animal contienen pequeñas cantidades de ácidos grasos insaturados en la configuración trans debido a los procesos de fermentación que tiene lugar en el sistema digestivo de los rumiantes. La configuración espacial de los ácidos grasos insaturados en conformación cis se caracteriza por su falta de linealidad. Esto previene el empaquetamiento de los mismos y por lo tanto aquellas grasas que contienen un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados se caracterizan por su estado fluido a temperatura ambiente. Esto no es así en el caso de ácidos grasos de configuración trans, en cuyo caso la molécula puede tener una conformación similar a la de los ácidos grasos saturados. Esta cualidad es la que atrajo a principios de este siglo a la industria alimenticia a modificar industrialmente los aceites vegetales con un gran porcentaje de ácidos grasos poliinsaturados en la configuración cis al objeto de asemejarlos a las grasas

sólidas, más atractivas al mercado de numerosos países acostumbrados al consumo de grasas animales sólidas (mantequillas, manteca).

Como ya se ha indicado anteriormente, el ser humano ha consumido pequeñas cantidades de ácidos grasos poliinsaturados en configuración trans como resultado del consumo de productos cárnicos. Sin embargo, su consumo en la dieta habitual se ha disparado de manera espectacular durante el curso de este siglo debido a los procesos industriales de hidrogenación de aceites vegetales. Este proceso consiste en la incorporación de hidrógeno en los dobles enlaces de los ácidos grasos produciendo su reducción química. El hecho de hidrogenar parte de los dobles enlaces de una grasa poliinsaturada es suficiente para que las grasas sean sólidas a temperatura ambiente. Sin embargo el proceso de hidrogenación es mucho más complejo y resulta en otras modificaciones moleculares que son de gran interés para el tema que aquí se discute. La más importante es tener en cuenta el proceso de isomerización de dobles enlaces. En el proceso de hidrogenación de grasas no se pretende una eliminación total de todos los dobles enlaces en las moléculas de ácidos grasos y por lo tanto todavía se mantiene un nivel de insaturación relativamente elevado, sin embargo un gran porcentaje de los dobles enlaces se isomerizan a su configuración trans, con lo cual, como ya se mencionó, desde el punto de vista estérico se comportan como moléculas saturadas.

La técnica de hidrogenación se comenzó a utilizar al final del siglo XIX y desde entonces el consumo de ácidos grasos trans ha aumentado considerablemente debido principalmente al consumo de margarinas y derivados en lugar de mantequilla y otras grasas animales. Es importante recordar que los ácidos grasos trans no se encuentran únicamente en las margarinas consumidas como tal, sino que posiblemente su mayor consumo tenga lugar como parte de alimentos preparados cuyo consumo varía

enormemente dependiendo del estado socioeconómico y cultural de la población.

La preocupación acerca del proceso de hidrogenación se genera debido al efecto de los ácidos trans sobre los niveles de lípidos plasmáticos. La razón inicial de esta preocupación se originó con un trabajo llevado a cabo por los científicos Mensink y Katan en el cual estos investigadores demostraron que el consumo del ácido elaídico (C18:1, trans) en lugar de ácido oleico (C18:1, cis) tuvo como resultado un aumento en los niveles de colesterol transportado por las lipoproteínas de baja densidad (LDL), que es el colesterol “malo”, así como en una disminución de las partículas de alta densidad¹. Otro aspecto importante que ha venido a añadir todavía más interés sobre los efectos asociados con el consumo de ácidos grasos trans es su posible efecto sobre los niveles de Lipoproteína (a). Varios estudios han demostrado que niveles elevados de esta lipoproteína constituyen un factor independiente de riesgo coronario.

La industria de aceites y grasas en Guatemala, específicamente la producción de margarinas, ha venido desarrollándose a mayor velocidad en los últimos años, teniendo como objetivo colocarse al mismo o superior nivel que las industrias internacionales, para lograr competir en el mercado con productos de calidad que satisfagan las necesidades de los clientes. De ahí radica la alta importancia de desarrollar un producto graso que sustituya a la margarina que tradicionalmente se produce, con el fin de eliminar estos compuestos orgánicos tan dañinos para la salud humana. Además que un producto con estas características sería sumamente atractivo para los consumidores nacionales e internacionales.

¹ ORDOVAS, José. “Ácidos grasos trans, lípidos plasmáticos y enfermedades coronarias. Pág 35

Es por ello que el fraccionamiento se perfila como la mejor opción técnica y económica para desarrollar este sustituto a partir del aceite de palma africana. Es necesario que se cuide la salud y el gusto de los consumidores, proporcionando productos a menor costo y con mejor calidad, por medio de la explotación adecuada del equipo y materia prima con que se cuenta.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Aceites y grasas

2.1.1 Ácidos grasos

Nombre común de un grupo de ácidos orgánicos, con un único grupo carboxilo (COOH), entre los que se encuentran los ácidos saturados de cadena lineal producidos por la hidrólisis de las grasas. El grupo incluye todos los demás ácidos saturados de cadena lineal e incluso ácidos con cadena ramificada o estructura cíclica. Los ácidos grasos pueden ser también no saturados o insaturados, es decir, pueden presentar dobles enlaces. El ácido metanoico (fórmico), HCOOH, y el ácido etanoico (acético), CH₃COOH, son los ácidos grasos más simples. Ambos tienen sabor amargo, irritan la piel y tienen un olor penetrante. Otros ácidos grasos saturados con estructura más complicada son el butanoico, el hexanoico y el octanoico, todos con un olor desagradable. Los ácidos esteárico y palmítico presentes en el aceite de palma africana son materiales grasientos que tienen poco olor. Ejemplos de ácidos grasos insaturados son el ácido oleico y el linoleico, ambos líquidos oleosos, incoloros o amarillentos.

El carácter de un ácido graso depende del largo de su cadena de carbonos, así como del lugar en donde por ausencia de átomos de hidrógeno, existan carbonos unidos por enlaces dobles.

2.1.2 Triglicéridos

Grasas y aceites o Triglicéridos son un grupo de compuestos orgánicos existentes en la naturaleza que consiste en ésteres formados por tres moléculas de ácidos grasos y una molécula del alcohol glicerina. Son sustancias aceitosas, grasientas o cerosas, que en estado puro son normalmente incoloras, inodoras e insípidas. Las grasas y aceites son más ligeros que el agua e insolubles en ella; son poco solubles en alcohol y se disuelven fácilmente en éter y otros disolventes orgánicos. Las grasas son blandas y untuosas a temperaturas ordinarias, mientras que los aceites son líquidos. Algunas ceras, que son sólidos duros a temperaturas ordinarias, son químicamente similares a las grasas.

Las grasas existen normalmente en los tejidos animales y vegetales como una mezcla de grasas puras y ácidos grasos libres. Las más comunes entre esas grasas son: la palmitina, que es el éster del ácido palmítico, la estearina o éster del ácido esteárico, y la oleína, éster del ácido oleico. Estos compuestos químicos puros existen en distintas proporciones en las grasas y aceites naturales, y determinan las características físicas de cada una de esas sustancias.

Las grasas se dividen en saturadas e insaturadas, dependiendo si los enlaces químicos entre los átomos de carbono de las moléculas contienen todos los átomos de hidrógeno que pueden tener (saturadas) o tienen capacidad para más átomos (insaturadas), debido a la presencia de enlaces dobles o triples. Generalmente, las grasas saturadas son sólidas a temperatura ambiente; las insaturadas y poliinsaturadas son líquidas. Las grasas

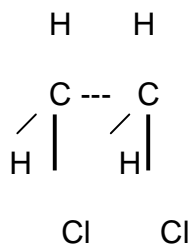
insaturadas se pueden convertir en grasas saturadas añadiendo átomos de hidrógeno.

Las grasas vegetales se obtienen normalmente extrayéndolas a presión de las semillas y frutos. Las grasas y aceites se consumen principalmente en alimentación. Algunos aceites no saturados, como el aceite de semilla de algodón y el de maní, se hidrogenan parcialmente para aumentar su punto de fusión y poder utilizarlos como grasas en pastelería y para cocinar. El sebo, que está formado por las grasas y aceites animales de las ovejas y el ganado vacuno, se usa para hacer velas y en algunas margarinas. Los aceites naturales que contienen ésteres de ácidos insaturados, se conocen como aceites secantes y poseen la propiedad de formar una película seca permanente cuando se les expone al aire. El aceite de linaza y otros aceites de este tipo se utilizan extensamente en la producción de pinturas. Las grasas sirven también como material en bruto para fabricar jabón.

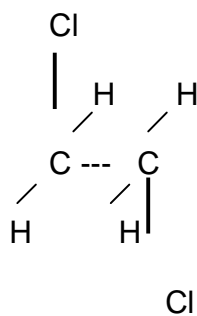
2.1.3 Isómeros

Dos o más moléculas con composiciones químicas idénticas, pero que difieren en la disposición de los átomos. Dos sustancias isómeras pueden diferir en sus propiedades físicas, químicas y biológicas: una puede ser una medicina útil y la otra ineficaz, una inofensiva y la otra explosiva. Los isómeros se clasifican en isómeros estructurales, en los cuales la secuencia de los átomos es diferente, y en estereoisómeros, en los cuales los átomos están unidos en el mismo orden, pero están orientados de forma distinta en el espacio. Un tipo particular de estereoisomería es la isomería cis-trans (isomería geométrica),

producida por una molécula forzada por la rotación limitada de los enlaces a una de las posibles posiciones.



Isómero cis



Isómero trans

2.1.4 Margarina

Producto alimenticio llamado en un primer momento oleomargarina, rico en grasas y aceites, y muy utilizada como sustituto de la mantequilla. En su forma original, la margarina fue desarrollada en 1869 por el químico francés Hippolyte Mège-Mouriès, que utilizó sebo vacuno como punto de partida. Desde entonces, los progresos en la refinación, la desodorización, el endurecimiento de aceites por hidrogenación, y la disponibilidad de mejores emulsionantes han introducido algunos cambios en la fabricación de la margarina, que es de color casi blanco y, al mezclarse con tinte vegetal amarillo, adquiere una apariencia muy similar a la de la mantequilla. La leche, bien sea entera o procesada, a

menudo constituye la porción acuosa de la margarina, a fin de que ésta tenga sabor a mantequilla, aunque está autorizado el uso de agua. La margarina puede fabricarse con un único aceite, siendo el más habitual el de girasol, o con una mezcla de aceites, tanto vegetales como animales. Los aceites vegetales son los más populares en la actualidad. Otros ingredientes que pueden añadirse a la margarina son: sal, colorantes y vitaminas.

2.1.5 Mantequilla

Grasa láctea solidificada que se usa como producto alimenticio y proviene, en su mayoría, de la leche de vaca. Para la fabricación de la mantequilla se extrae, de forma manual o mecánica, la nata de la leche. Tras su pasteurización, se bate la nata hasta que se coagula la mantequilla. Más tarde, la mantequilla en bruto se trabaja (o amasa) y se lava con agua para eliminar al máximo el suero lácteo y otros componentes no grasos. En ocasiones se le añaden colorante y vitamina A.

La mantequilla debe contener entre un 80 y un 85% de grasas (y no más de un 16% de agua), de las que un 60% son saturadas, una pequeña proporción poliinsaturadas (3%) y el resto monoinsaturadas.

2.1.6 Aceite de palma africana

2.1.6.1 Generalidades

Aceite de palma, grasa vegetal que se obtiene a partir de los frutos y las semillas de la palma de Guinea o palma de aceite.

Esta palmera, *Elaeis guineensis*, pertenece a la familia Palmáceas. Es una planta de hasta 20 m de altura cuyo tronco termina en una corona de hojas pinnadas. Su área de distribución natural es la zona tropical del oeste de África, pero se ha aclimatado en las regiones sudamericanas con condiciones físicas similares. Precisa suelos fértiles y estaciones lluviosas que produzcan inundaciones. La importancia económica radica en sus frutos. Son drupas en las que, tanto el pericarpio del fruto, como la semilla, son oleaginosos.

El aceite de palma clásico se obtiene por la decantación del pericarpio hervido en agua, aunque hay métodos industriales que facilitan la obtención del aceite también de la semilla. Es un aceite muy parecido al de coco. Su punto de fusión elevado indica un contenido alto de ácidos grasos saturados.

A escala industrial se efectúa un fraccionamiento físico del aceite de palma blanqueado y desodorizado (palma RBD), del que se obtiene dos fracciones, de las cuales, a temperatura ambiente, una es líquida (la oleína) y otra es sólida (la estearina), la primera se produce en proporción más abundante que la segunda. La oleína es el éster del ácido oleico (trioleato de

glicerina), mientras que la estearina es el éster del ácido esteárico (triestearato de glicerina).

El fraccionamiento se logra con el uso de unidades de cristalización, en las que el aceite de palma es introducido a una temperatura relativamente alta, que se hace descender gradualmente y de forma automática para generar la adecuada enucleación, que permite obtener posteriormente, con el uso de un filtro hidráulico de tipo prensa (de placas), que trabaja a alta presión, las fracciones oleína y estearina, de tal modo que la oleína escapa a través de las placas del filtro y la estearina queda atrapada dentro de ellas.

2.1.6.2 Composición del aceite de palma africana

Tabla I. Composición de ácidos grasos de la palma africana

Ácido graso	Configuración	Composición (%)
Ácido Palmítico	C16:0	45
Ácido esteárico	C18:0	4
Ácido oleico	C18:1	39
Ácido linoleico	C18:2	10
Otros		2

Fuente: Hui Y. H. *Bailey's Industrial Oil & Fat Products*. Pág. 39

El aceite que se obtiene de la palma africana, tiene básicamente cuatro ácidos grasos principales. Dos de ellos son insaturados (ácidos oleico y

linoleico), constituyen el 49% del aceite y son líquidos a temperatura ambiente. Los otros dos, palmítico y esteárico, son ácidos grasos saturados y sólidos a temperatura ambiente, constituyendo el 51%, siendo el ácido palmítico el principal. A partir del ácido esteárico y una mezcla de los otros ácidos grasos, se puede empezar a pensar en obtener directamente una base para margarina, sin tener que someterse a transformaciones químicas.

La razón de escoger el ácido graso esteárico es que no es tan perjudicial para el colesterol como el palmítico que se incorpora mal al organismo y se excreta mucho. Y si se incorpora, el hígado lo transforma en un más beneficioso ácido graso oleico, que es el que va a la sangre.

2.1.7 Proceso tradicional de producción de margarina

2.1.7.1 Hidrogenación

La hidrogenación en aceites y grasas consiste en una reacción química en la cual el hidrógeno se adiciona a los dobles enlaces encontrados de forma natural en los triglicéridos presentes en aceites de origen vegetal y animal. La adición catalítica de hidrógeno a los dobles enlaces en las cadenas de ácidos grasos libres provee una manera efectiva de modificar las propiedades de los aceites y grasas.

La hidrogenación es el único proceso utilizado en la manufactura de aceites y grasas que permite alterar la estructura molecular de ésteres de

glicerol. La reacción química producida es complicada, debiéndose a varios factores, uno de ellos corresponde a la isomerización simultánea de los enlaces insaturados que ocasiona cambios en la configuración geométrica de la molécula en el espacio alrededor de las dobles uniones, la configuración natural cis se cambia a la posición trans. Cuando se hidrogenan aceites puros o mezclas de aceites con oleína de palma, el punto de fusión aumenta y disminuye el índice de yodo por efecto de la saturación de los dobles enlaces convirtiendo los aceites líquidos a sólidos.

La hidrogenación catalítica de aceites y grasas como anteriormente se mencionó, es una reacción compleja que ocurre como resultado de reacciones simultáneas o de competencia, lo que incluye:

1. Hidrogenación: Saturación del doble enlace en las cadenas de ácidos grasos.
2. Isomerización geométrica: Cambio de la forma cis a trans en los dobles enlaces de las cadenas de ácidos grasos.
3. Isomerización posicional: Rearreglo de las posiciones del doble enlace en las cadenas de ácidos grasos.
4. Conjugación: Formación de sistemas conjugados de doble enlace en las cadenas poliinsaturadas de ácidos grasos.

Sin catalizador la reacción de hidrogenación es muy lenta dado que la energía de activación requerida para activar complejos es muy alta. Existen dos formas de hidrogenación una selectiva y otra no selectiva, la hidrogenación selectiva es cuando se quiere saturar cierto ácido graso como por ejemplo el linolénico que es un ácido graso inestable que contiene el aceite de soya que es el que le da la reversión a olor pescado y se hidrogena selectivamente a linoleico.

En presencia de un catalizador, dos reacciones son posibles, en el primer caso, el catalizador forma un complejo activado con el segundo enlace, el más alejado, el cual es atacado por la molécula de hidrógeno para formar un segundo compuesto activado. El segundo complejo es capaz de transferir hidrógeno al segundo enlace para dar un producto y catalizarse libremente.

En el segundo caso, el segundo enlace y la molécula de hidrógeno interactúa simultáneamente con los sitios activados para formar dos complejos activados que reaccionan para formar un tercer complejo. El subsecuente rompimiento del tercer complejo produce los productos y la catalización libre.

Reacción:

CATALIZADOR



2.1.7.2 Catalizadores para hidrogenación

El catalizador de níquel es el más usado en la industria, como los son, además, otros catalizadores de paladio y cromato de cobre. El metal níquel, se prepara a través de un proceso de reducción o por precipitación, es frecuentemente apoyado por la adición de tierra diatomácea o de blanqueo, o de otros materiales refractarios para formar las partículas del catalizador.

El catalizador de níquel puede ser modificado para producir diferentes tamaños de poros y geometrías de superficie para obtener un mejor efecto en la selectividad, isomerización y la cinética del proceso de hidrogenación. También

puede ser tratado con cantidades controladas de agentes sulfonados para producir un alto nivel de isomerización pero a expensas de una baja actividad.

El tamaño del catalizador puede ser del orden de los 5 μ m para facilitar su filtración del aceite después de la hidrogenación. Los poros sólidos de las partículas son en el caso del níquel, de una superficie en el rango de 50-100 m²/g.

2.1.7.3 Efectos de las variables en la hidrogenación

Los parámetros que más afectan la hidrogenación son:

- a. Concentración del catalizador.
- b. Temperatura.
- c. Agitación.
- d. Presión de hidrogenación.

Concentración del catalizador

A bajo nivel de concentración de catalizador, hay un incremento considerable de la cantidad de hidrógeno empleada. Como es típico, si una concentración mayor de catalizador es agregada, el punto es extender, en la medida de lo posible, la acción de la hidrogenación sin incrementar la cantidad de hidrógeno empleada. El aumento de la concentración de catalizador provoca, algunas veces, un escaso e insignificante descenso en la formación de la instauración del tipo trans y en la selectividad de la reacción.

Temperatura y agitación

Un incremento en la temperatura acelera la hidrogenación. A altos niveles de agitación, el rango de temperatura aumenta de manera constante, indicando que la reacción está cinéticamente controlada. A bajos niveles de agitación, el efecto de la temperatura es menor y se hace más pronunciado negativamente, indicando, que este tipo de fenómeno de transporte afecta de manera directa la hidrogenación, por lo que debe ser cuidadosamente controlado.

El incremento de temperatura aumenta la solubilidad del hidrógeno en el aceite y hace descender la viscosidad del aceite, lo que se ve favorecido con una buena agitación. Al mismo tiempo, una elevada temperatura, causa una reacción rápida sobre la superficie del catalizador. El aumento de la porción de hidrógeno agregada guarda relación directa con el aumento del avance de la reacción, por lo que la hidrogenación debe ser constante, para que sea correcta.

Si la reacción de hidrogenación es muy rápida, la superficie del catalizador se ve reducida parcialmente en su efecto, provocando la subsecuente disminución de la isomerización, aunque se trabaje a buena temperatura.

La principal función de la agitación es proporcionar la disolución del hidrógeno en la mayor fracción de superficie de catalizador. Por aparte, también ayuda a asegurar uniformidad de la temperatura, y hacer que todas las partículas estén suspendidas. El efecto de incrementar la agitación a baja

temperatura, cuando el rango es alto, es poco perceptible como beneficio. Con respecto al efecto de aumentar la agitación, en la selectividad, a baja temperatura, se sabe que generalmente disminuye la isomerización.

Presión

El efecto de la presión en la hidrogenación, es básicamente sobre la solubilidad del hidrógeno en el aceite. Altas presiones impulsan la acción del hidrógeno, incrementando su efecto.

2.1.8 Terminado de la margarina

Previo a ser empacada, la base para margarina hidrogenada recibe el terminado final. En este punto es donde se le adicionan los compuestos que le proporcionan la presentación característica propia de la margarina. Dentro de los que se puede mencionar colorantes, saborizantes, vitaminas, sales, emulsificantes, antioxidantes, acidificantes, etc.

2.2 Fraccionamiento

2.2.1 Generalidades

El fraccionamiento es un proceso de separación física que consiste en un enfriamiento controlado de aceite de palma africana refinada físicamente con el objetivo de separar la fracción líquida de la fracción sólida por medio de filtración. En la industria comúnmente se le llama oleína a la fracción líquida, la cual es un aceite, y estearina a la fracción sólida, la cual es una manteca.

El fraccionamiento se logra con el uso de unidades de cristalización, en las que el aceite de palma africana refinado físicamente es introducido a cierta temperatura, que se hace descender gradualmente y de forma automática para generar la adecuada enucleación, que permite obtener posteriormente, con el uso de un filtro hidráulico tipo prensa (de membrana), que trabaja a alta presión, las fracciones oleína y estearina, de tal modo que la oleína escapa a través de las placas del filtro y la estearina queda atrapada entre ellas.

Las dos fracciones separadas son de alta pureza, además de ser materias primas que aportan excepcionales cualidades a las mezclas, ya sea de aceite o de manteca en las que se emplean, mejorando la calidad de los productos elaborados a partir de ellas, aumentando así la ventaja competitiva de la industria de grasas y aceites.

2.2.2 Cristalizadores Industriales

El siguiente resumen de características físicas debe orientar el diseño del equipo utilizado en el control de las diferentes etapas. Anteriormente se han mencionado términos tales como enfriamiento, agitación, sobresaturación, etc. Todos ellos deben controlarse en el cristalizador a fin de que la materia grasa que desee fraccionarse siga una curva de enfriamiento y cristalización definida, la que mejor corresponda a la curva de grasa sólida del producto.

Las características de los cristalizadores son:

- Superficie de enfriamiento por unidad de volumen:

$$M^2/M^3$$

- La transferencia de calor depende de la superficie de enfriamiento:

$$Q = K \times S \times \Delta T$$

- La velocidad de agitación del cristizador es un factor que determina: El coeficiente de transmisión K: cuando mayor sea la agitación, mayor es el coeficiente de transmisión.

Una agitación orientada permite el proceso de enucleación secundaria. Una agitación excesiva provoca la formación de un gran número de cristales pequeños, obteniéndose una masa incontrolable e imposible de filtrar.

Es necesaria, por tanto, una velocidad de giro variable de los agitadores, a fin de optimizar la curva de enfriamiento de cristalización.

- La homogeneidad del producto en los cristalizadores: Para conseguir que cada partícula dentro de la masa del producto tenga la misma temperatura (sobresaturación homogénea) la distancia entre cada partícula de aceite y la superficie de enfriamiento debe ser lo más pequeña posible. Debe evitarse que las partículas permanezcan inmóviles, tratando al mismo tiempo que se acerque lo más posible a la pared de enfriamiento para favorecer la eliminación de la energía de cristalización.
- El diseño de la agitación es fundamental para el coeficiente de transferencia calorífica. Un cristizador correctamente diseñado se alcanzan coeficientes de intercambio calorífico entre 100 y 175 Kcal/h M² °C.

La fidelidad a estos cuatro criterios mecánicos es una condición 'sine qua non' para conseguir un proceso de cristalización cuyos resultados sean

reproducibles. Sí el cristalizador está bien diseñado, la temperatura no debe elevarse al iniciarse la cristalización. Un aumento incontrolado de la temperatura puede hacer que se fundan los cristales y originar un magma imposible de filtrar.

2.2.3 Curvas de enfriamiento

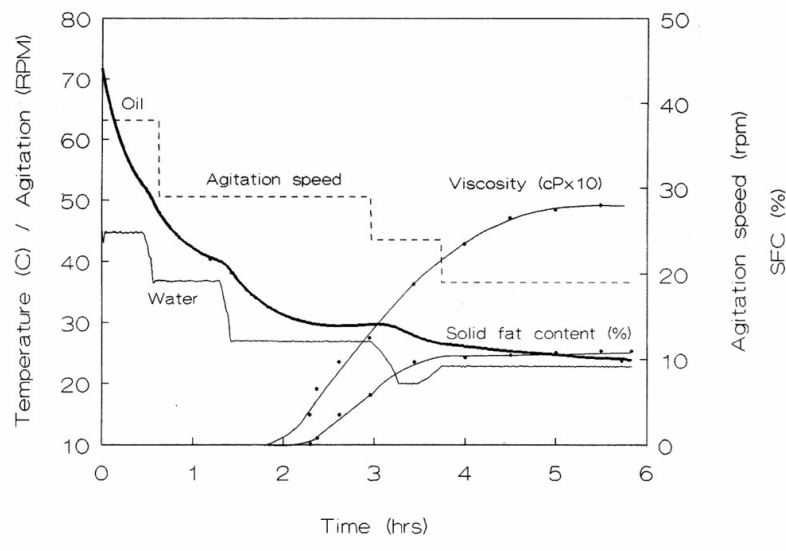
La curva de enfriamiento es otro criterio importante que debe respetarse para conseguir un punto de cristalización que produzca una fácil filtración y con bajo nivel de oclusión del líquido. Esta curva regula la velocidad de enfriamiento y el tiempo de residencia del aceite en el cristalizador para cada temperatura. La posibilidad de controlar la temperatura del líquido refrigerante dentro de un perfil de temperaturas bien definido permite crear, a su vez, un perfil preciso de temperaturas en el aceite, que respeta al mismo tiempo el tiempo de residencia, requerido para controlar la velocidad de enucleación a una temperatura determinada, el tamaño de cristal y la cantidad de aceite ocluido en los cristales.

Existen algunos dispositivos de laboratorio que ayudan a determinar la curva óptica de enfriamiento de cristalización.

- La resonancia magnética nuclear (RMN) permite medir en cualquier momento la cantidad de grasas cristalizadas y detectar cuando comienza la cristalización y cuando se ha estabilizado el contenido de grasas cristalizadas.
- Con un viscosímetro se puede determinar cuando debe realizarse la filtración.
- La técnica de calorímetro de exploración diferencial permite seguir la transición de fase con mucha claridad.

Finalmente, para el funcionamiento de ciertas sustancias grasas debe tenerse en cuenta si se trata de una sustancia en bruto o refinada. Para obtener ciertas fracciones, es necesario utilizar sustancias perfectamente refinadas mientras que para obtener otras no importa el tipo de sustancia que se utilice.

Figura 1. Curvas de enfriamiento típicas



Fuente: PORIM. *International Palm Oil Congress, Competitiveness for the 21st century*.
 Pág. 337

2.2.4 Diferentes tipos de procesos de fraccionamiento

2.2.4.1 Fraccionamiento en mezcla con disolvente

En este proceso, las materias grasas se separan mediante un disolvente, normalmente hexano o acetona. La utilización de un disolvente garantiza un mejor control y, por tanto, una cristalización más selectiva. Otra ventaja es el hecho de que el líquido ocluido en los cristales no es la oleína pura, sino una mezcla más o menos concentrada. A continuación, los cristales pueden lavarse

con un disolvente, aumentando aún más su pureza. Estos procesos se utilizan para la producción de sustitutos de manteca de cacao y otros productos especiales.

Sin embargo, este proceso ha perdido mucho interés actualmente, a causa de la disminución sensible del precio de la manteca de cacao y del desarrollo de otras tecnologías. Por otra parte, la inversión inicial y su coste de explotación lo hace menos atractivo.

2.2.4.2 Fraccionamiento en fase acuosa con detergente y Electrolitos

Durante mucho tiempo se intentó mejorar la separación de la estearina de la oleína añadiendo agua al producto que se iba a fraccionar. Esta agua, previamente preparada con los aditivos necesarios, ocupa el lugar de la oleína ocluida en los cristales. Este es el proceso Lanza, que ha sido mejorado varias veces desde su invención. Hace aproximadamente diez años, era muy popular debido a su alto rendimiento en oleína. Hoy en día, son varios motivos que le restan interés.

- La legislación de varios países importantes ya no admite en la industria alimenticia los detergentes que se suelen utilizar en estos procesos.
- Los detergentes mismos representan un costo fijo nada despreciable.
- Los detergentes tienden a descomponerse a largo plazo, dando lugar a compuestos de alto poder corrosivo.
- La opinión pública está actualmente tan sensibilizada a estos problemas que este Proceso se utiliza sólo cuando no hay otra alternativa posible, lo que ocurre rara vez.

2.2.4.3 Fraccionamiento en fase oleica o fraccionamiento en seco

Es el proceso más conocido actualmente, debido a que la inversión inicial y los costos de explotación son bajos, no se utilizan reactivos y no hay pérdidas de productos. El principal coste de explotación es la electricidad que se utiliza para generar frío. No puede descartarse que, en el futuro, este método de fraccionamiento ocupe una parte importante del mercado de transformación de aceites de grasas, arrebatando el primer lugar a la hidrogenación. La hidrogenación es un proceso muy costoso y todavía es cuestión por los expertos en nutrición debido a la producción de isómeros trans.

2.2.5 Separación de cristales del aceite líquido

Se han utilizado varias técnicas para separar la estearina de la oleína en los procesos de fraccionamiento en seco: En un principio, se utilizaba una prensa de filtrar estándar formada por una placa y un bastidor. Sus inconvenientes eran:

- La dificultad para secar la torta.
- El vaciador de la torta era una operación manual que requería mucha mano de obra.

Para aminorar estos inconvenientes, se utilizaron filtros de vacío. Actualmente existen dos tipos en el mercado:

- De correa transportadora.
- De tambor rotatorio.

El filtro de correa transportadora se utiliza mucho en la industria química, principalmente en filtraciones difíciles. Existen muchos fabricantes de este tipo de equipos. Uno de los más conocidos en la industria aceitera es el “Florentine” de Ets. Tirtiaux.

La complejidad mecánica de este tipo de filtros ha propiciado el estudio de otras alternativas. Una de ellas es el filtro de tambor rotativo en vacío, muy utilizado también en la industria química. La torta de estearina se descarga mediante una correa, un montante o un raspador. Este último sistema es extremadamente sencillo y casi siempre puede utilizarse en el fraccionamiento de aceites comestibles. Principalmente es apreciado por su diseño mecánico sencillo y bajo costo. Permite separar estearinas y oleínas en todas las aplicaciones de la industria aceitera. Existe un gran número de fabricantes de este tipo de filtros en Holanda, Reino Unido, Estados Unidos, etc.

Desde principios de los 80, debido al impulso de la importante producción de aceites de palma de Malasia, se han venido utilizando prensas de filtrado de membranas hinchables para la separación de oleína y estearina. Este filtro también se utiliza mucho en la industria química. Se trata de una prensa de filtro convencional con cámaras huecas cuyas placas están revestidas de una membrana elástica. Una vez llena la cámara de estearina, se inyecta aire comprimido entre la placa y la membrana enviando el contacto del aire con el producto para evitar problemas de oxidación. La membrana cede y extrae progresivamente la oleína contenida en la torta de estearina. Esta técnica ha llegado a imponerse casi totalmente en el sureste asiático para la producción de oleína de palma, y ha permitido aumentar del $\pm 70\%$ al $\pm 80\%$ el rendimiento en la oleína del aceite de palma.

La elección final entre un sistema de filtración y otro se hacen en función de los precios de la oleína y de la estearina. En el sureste Asiático, la rentabilidad del fraccionamiento del aceite de palma viene a determinar por el rendimiento en oleína, lo que explica el éxito del filtro de membrana. En América latina, sin embargo, se valoran mucho más la producción de estearina, como componentes en margarinas y grasas de freír, puesto que suele ocuparse el filtro rotatorio. Para productos delicados y sensibles a la oxidación, el filtro de membrana es el más indicado, porque no requiere soplado de aire posterior para secar la torta.

2.2.6 Enucleación homogénea

En un líquido sobresaturado y sin impurezas, los núcleos cristalinos se forman en tres etapas.

Las moléculas de triglicérido en un líquido están en constante movimiento. Cuando dos moléculas se aproximan, pueden permanecer juntas cierto tiempo. En Algunos casos, una tercera y una cuarta molécula se unen a las dos primeras y forman un grupo.

Cuando aumenta el número de moléculas contenidas en el grupo, éste pasa a ser lo que se denomina un embrión. Los embriones no son estables y en cualquier momento pueden deshacerse y volver al estado de grupo. Sí el nivel de sobresaturación es suficiente, estos embriones crecen y forman núcleos.

Estos núcleos son más o menos estables pero, si el nivel de sobresaturación es suficiente, crecen hasta formar cristales. La formación de cristales depende del equilibrio energético entre la energía cedida por el cambio

de estado (energía de cristalización) y la energía absorbida para aumentar la superficie del cristal a fin de compensar la disminución de la tensión superficial.

En la práctica, el proceso de enucleación homogénea no existe y siempre este presente algún cuerpo extraño, aunque sólo sea el recipiente en el que se encuentra el líquido.

2.2.7 Enucleación heterogénea

La presencia de cualquier elemento sólido en el líquido sobresaturado acelera la enucleación. El sólido actúa como cebador de la cristalización, al disminuir la energía de activación necesaria para alcanzar el estado cristalino. Estos sólidos pueden ser, por ejemplo, las paredes del cristizador, las palas del agitador, impurezas mecánicas (polvo) o trazas de humedad en forma de micro gotas.

2.2.8 Enucleación secundaria

Un cristal en movimiento en un líquido sobresaturado puede perder elementos de su estructura que, a su vez, constituyen embriones que formarán núcleos de cristales. Este se conoce como enucleación por corte.

2.2.9 Enucleación por contacto.

Este tipo de enucleación es el más frecuente y constituye la causa principal de enucleación en un líquido sobresaturado.

2.2.10 Crecimiento de cristales

Una vez formados los núcleos, los cristales pueden crecer y estabilizarse, es decir, el estado de mayor punto de fusión. Durante la cristalización se produce combinaciones moleculares ordenadas acompañadas de una liberación de energía: 50 Kcal/mol para el triestearato de glicerina (estearina de palma).

2.2.11 Principales formas cristalinas de un triglicérido

- La forma alfa, de corto tiempo de vida y favorecida por la presencia de mono y diglicéridos. Tiene el punto de fusión más bajo.

- La forma beta prima es más estable y tiene un punto de fusión más alto. Es la forma requerida para el fraccionamiento. La forma beta, la más estable pero rara vez utilizable para el funcionamiento.

La conversión de una forma a otra requiere cierto tiempo, dado que las moléculas tienen que reordenarse. Un enfriamiento rápido del líquido puede evitar la cristalización dando lugar a un producto "vidrioso". Desgraciadamente, los triglicéridos no forman cristales puros sino que dan lugar a estructuras sólidas que contienen más o menos oleína ocluida.

La dureza de los cristales no depende sólo del modo de control de la cristalización, sino también de la presencia de "impurezas" o productos extraños en el líquido sobresaturado.

3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

3.1 Unidades de cristalización

Durante la cristalización, el aceite es enfriado hasta su temperatura de filtración mediante una bien determinada curva de enfriamiento, la cual asegura la formación óptima de cristales. La curva de cristalización a ser seguida para el fraccionamiento de palma es completamente diferente a la usada para oleína de palma y estearina de palma.

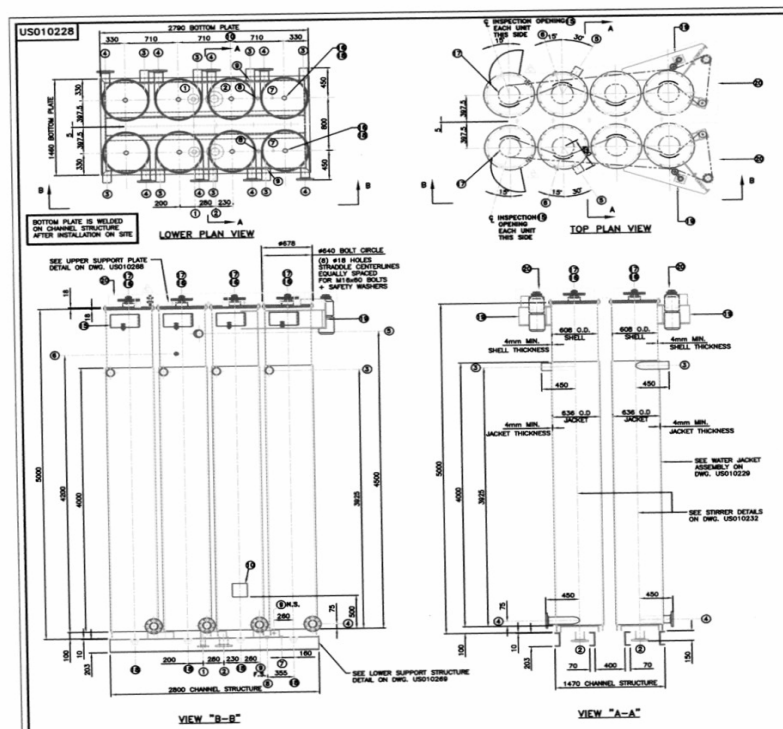
Los cristalizadores son dispositivos cilíndricos con una gran superficie de enfriamiento (doble chaqueta) y están equipados con agitadores que barren el aceite cerca de dicha superficie. Estos agitadores garantizan que el producto tenga una máxima homogeneidad y alto intercambio de calor durante todo el proceso.

Cada cristizador está también equipado con agua en circulación. Las temperaturas del aceite y agua son medidas y almacenadas. La temperatura del agua es controlada por el microprocesador en un programa paso a paso, produciendo una curva de enfriamiento suave en un tiempo determinado. Además están equipados con un motoreductor con controlador de frecuencia y sensores de temperaturas. El material de este equipo es hierro negro, con una capacidad de alrededor de 8000Kg.

Los patrones correctos de enfriamiento aseguran tiempos flexibles y aceptables. El tiempo puede ser fácilmente adaptado de acuerdo con lo que

requiere el producto. Los cristales obtenidos son medianos en tamaño, fáciles de filtrar y con una estructura estable de la forma β' .

Figura 2. Unidades de cristalización



Fuente: PORIM. *International Palm Oil Congress, Competitiveness for the 21st century*. Pág 309.

3.2 Enfriador de agua

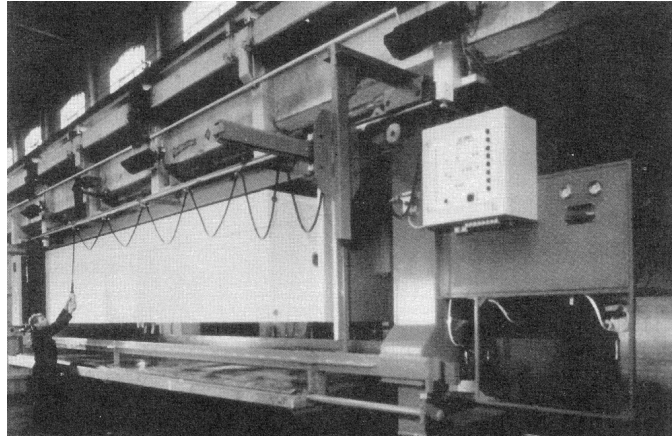
Este es el encargado de proporcionar el agua de enfriamiento para el sistema de intercambio de calor dentro de la unidad de cristalización. Está compuesto por un compresor freón R134a de nueva generación de tipo hermético, trabajando alternativamente con las necesidades de enfriamiento; completado con válvulas de cierre, bomba de calentamiento de aceite y todos sus accesorios.

La superficie de condensación del tipo concha y tubos, tiene cabezas removibles enfriadas por agua de una torre de enfriamiento. Posee además un enfriador evaporador que sirve para enfriar el agua. Completado con carga freón de nueva generación, válvulas, controles y accesorios. Cuenta con un panel eléctrico con los relays y controles necesarios.

3.3 Filtro prensa de membranas

El desarrollo de la técnica de filtración tipo prensa ha hecho un claro mejoramiento en la eficiencia de separación. Hoy, la mayoría de las instalaciones de fraccionamiento están equipadas con un filtro prensa de membranas. El filtro de membrana consiste en una serie de placas cámaras que se mantienen juntas por medio de un cilindro hidráulico. La superficie de filtración disponible es mayor comparada con otro tipo de filtro, permitiendo una filtración más rápida y uniforme. Los cristales formados en la unidad de cristalización, después de haber sido concentrados llenando las cámaras de filtración, son adicionalmente exprimidas por medio de la membrana inflable, de la cual resulta una mejor remoción de la fase líquida entrante y una alta concentración de oleína. Debido a la alta presión diferencial aplicada, la separación es menos sensitiva para provocar cambios en la estructura de los cristales. El filtro prensa de membranas es un proceso semicontinuo, el cual se divide en dos: filtración y exprimido.

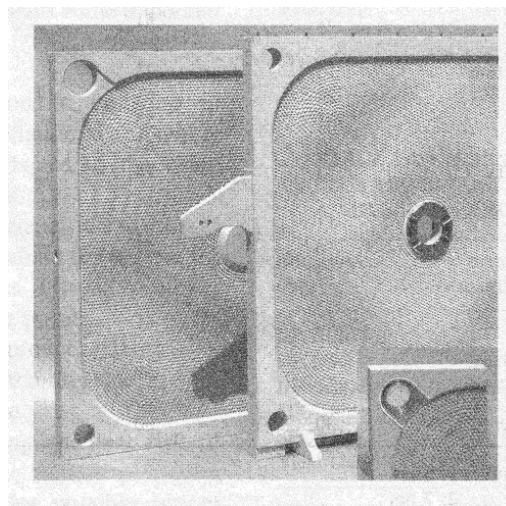
Figura 3. Filtro prensa de membranas



Fuente: Hui Y. H. *Bailey's Industrial Oil & Fat Products*. Pág. 310

El filtro consta de 69 placas de una sección de 1500mm con una presión de trabajo máxima de 16bar. Posee también un sistema hidráulico de presión por medio de agua presurizada. Los elementos filtrantes de las membranas en cuestión son totalmente hechos de una calidad especial de polipropileno.

Figura 4. Placas de membrana



Fuente: PORIM. *International Palm Oil Congress, Competitiveness for the 21st century*. Pág, 306

4. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

4.1 Fase teórica

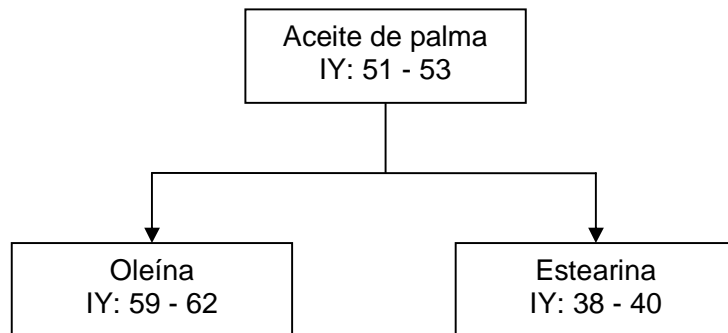
El fraccionamiento es un proceso de modificación totalmente reversible. Es básicamente un proceso de separación termomecánica en la cual una mezcla de multicomponentes es físicamente separada en dos o más fracciones con distintas propiedades físicas y químicas². La separación puede ser basada en una diferencia de solidificación, solubilidad o volatilidad de los diferentes compuestos.

En la industria de aceites y grasas que tiene al aceite de palma africana como insumo fundamental, tiene en el proceso de fraccionamiento, el objetivo principal de obtener fracciones de oleína con punto de nube bajo (menor de 6°C) y buena estabilidad en frío, así como también obtener fracciones de estearina con punto de fusión entre 44 a 52 grados Celsius. Las oleínas son usadas como sustitutos para aceites suaves para cocinar o ensaladas, mientras que las estearinas encuentran aplicación en grasas especiales para freír, margarinas y mantecas.

En el proceso fraccionamiento, el aceite de palma africana entra con un punto de fusión promedio de 41°C y un índice de yodo de 52; y se obtienen dos fracciones. Una líquida (oleína) con un punto de fusión de 14°C e índice de yodo de 60; y otra sólida (estearina) con un punto de fusión de 49°C y un índice de yodo de 40. Tal como lo muestra la figura.

² Hui Y. H. Bailey's Industrial Oil & Fat Products. Pág 301

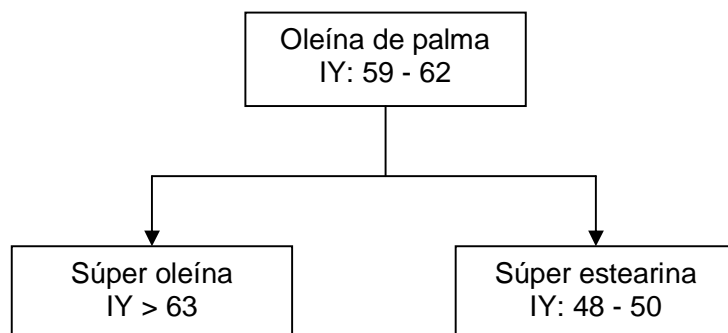
Figura 5. Fracciones de aceite de palma africana



Fuente: Hui Y. H. *Bailey's Industrial Oil & Fat Products*. Pág. 327

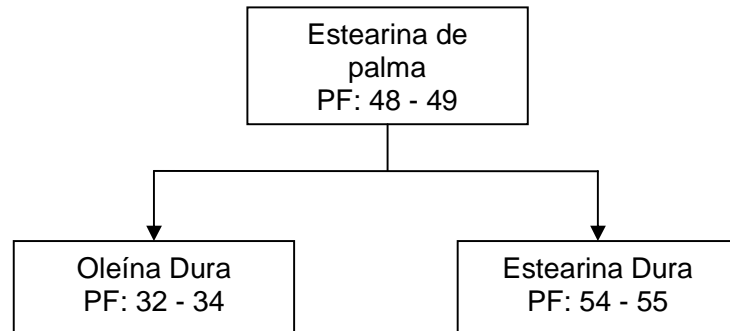
A partir de la oleína y la estearina, por medio del proceso de fraccionamiento, se pueden obtener otras fracciones que tienen también una gran aplicación dentro de la industria de grasa y aceites. Esto es debido a que el aceite de palma dentro de su composición física y química, posee una gran variedad de triglicéridos con diferentes niveles de saturación o insaturación. Al fraccionar oleína se obtiene súper oleína con un índice de yodo arriba de 63 y súper estearina con un índice de yodo de 48 a 50. De igual manera al fraccionar la estearina se obtiene una oleína con un punto de fusión de 32°C y otra estearina con un punto de fusión de 54°C.

Figura 6. Fracciones de oleína de palma



Fuente: Hui Y. H. *Bailey's Industrial Oil & Fat Products*. Pág. 327

Figura 7. Fracciones de estearina de palma



Fuente: Hui Y. H. *Bailey's Industrial Oil & Fat Products*. Pág. 328

Pero es el diagrama que muestra la figura No. 5 el principal proceso de fraccionamiento en la industria, razón por la cual se empezara de este punto en este trabajo de investigación.

El objetivo principal de este trabajo de graduación es establecer si es factible técnicamente obtener un sustituto de la base para margarina hidrogenada a partir del proceso de fraccionamiento, siendo sumamente importante mantener la relación técnico - económico. El número de fraccionamientos realizados a un mismo batch de aceite tiene una relación directamente proporcional al costo del proceso. Al mismo tiempo, al realizar más fraccionamientos a un mismo batch de aceite, se consigue un producto más puntual en cuanto a las características físicas y químicas deseadas.

En este trabajo se pretende llegar a este producto por medio de dos caminos. Uno al que se le llamará 2 fraccionamientos (2F) a partir de la estearina que tiene un punto de fusión de 49°C y otro que se le llamará 3 fraccionamientos (3F) a partir de la oleína dura de punto de fusión 33°C. Obviamente el proceso 3F dará como resultado un producto más saturado que

podría utilizarse como margarina sin refrigeración y el proceso 2F proporcionará un producto menos saturado que encontraría su aplicación como margarina que necesite refrigeración. Siendo el proceso 2F más económico que el proceso 3F. Los diferentes caminos se muestran en las siguientes figuras.

Figura 8. Camino proceso 2F

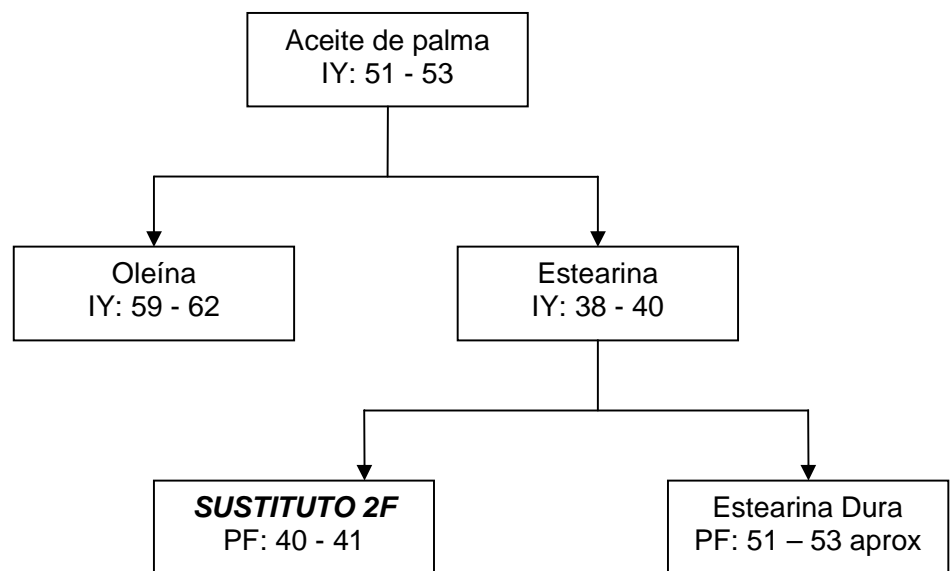
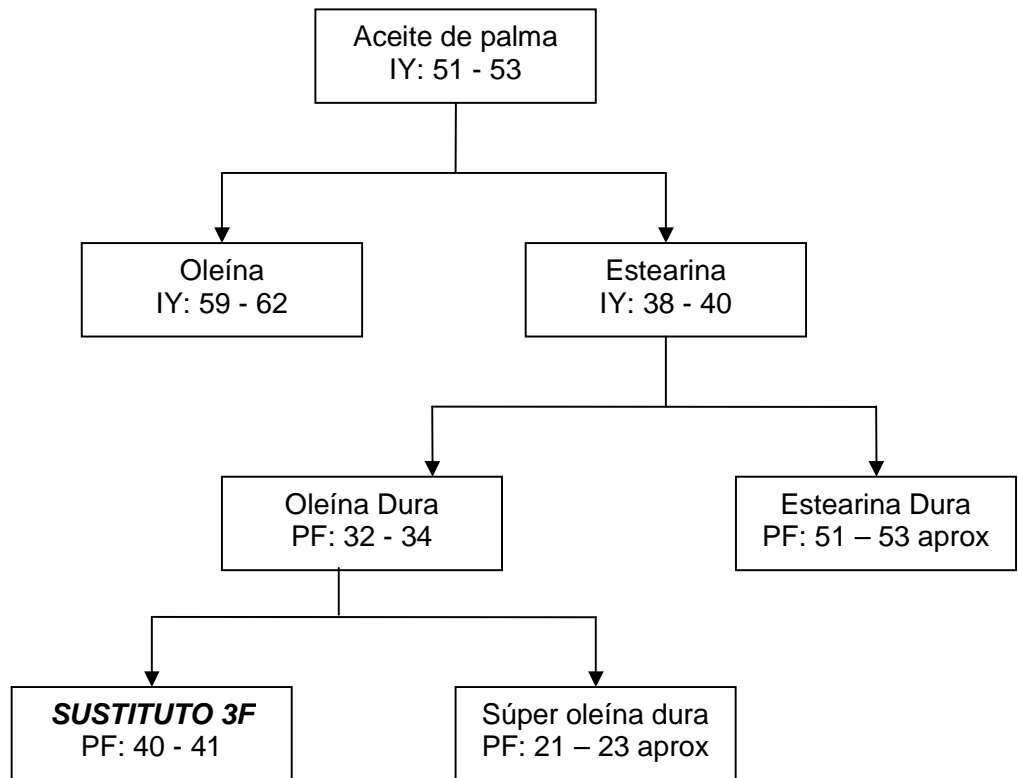


Figura 9. Camino proceso 3F



Las características reológicas de margarinas terminadas son expresadas en términos tales como consistencia, textura, plasticidad, dureza, estructura y untabilidad³. Estas características son relacionadas con un número de factores variables. Estas son la temperatura de fusión, concentración de la fase dispersa, contenido de grasa sólida, nivel de saturación, tamaño, forma y distribución de los cristales, fuerzas de Van der Waals y tratamiento mecánico. Las bases obtenidas por medio del proceso de fraccionamiento, como ya se ha mencionado, deben de cumplir con las propiedades físicas y químicas de la base para margarina hidrogenada que se maneja industrialmente. Dichas propiedades se muestran en las siguientes tablas.

³ Ibid., p 33

Tabla II. Parámetros del contenido de grasa sólida (NMR)

	Margarina para refrigerar (suave)	Base sin refrigerar (dura)
% de sólidos a 10.0°C	67 – 70	75 – 81
% de sólidos a 21.1°C	35 – 40	45 – 49
% de sólidos a 26.7°C	19 – 22	27 – 31
% de sólidos a 33.3°C	6 – 10	12 – 16
% de sólidos a 40.6°C	0	3 – 6

Fuente: Laboratorio de control de calidad, Olmeca S.A.

Tabla III. Parámetros de los análisis fisicoquímicos (AOCS)

Propiedad fisicoquímica	Margarina para refrigerar (suave)	Base sin refrigerar (dura)
Punto de fusión (°C)	39 – 41	42 – 43
Índice de yodo (wijs)	60 – 65	40 – 45

Fuente: Laboratorio de control de calidad, Olmeca S.A.

De la misma manera, por medio de un análisis cromatográfico, se evaluará el contenido de ácidos grasos de la base obtenida en el experimento, para luego compararla con la cromatografía realizada a una base para margarina hidrogenada. De esta forma se podrá apreciar la ausencia de isómeros trans en el producto obtenido en la planta de fraccionamiento. El análisis cromatográfico de la base para margarina hidrogenada, con la cual se comparará la base producida por fraccionamiento, se muestra a continuación.

Tabla IV. Perfil cromatográfico de una base para margarina hidrogenada.

Ácidos grasos	Composición (%)
Ácidos saturados	54.0304
Ácidos monoinsaturados	35.9142
Ácidos poliinsaturados	2.8236
Isómeros Trans	7.3076

Fuente: perfil cromatográfico, base para margarina hidrogenada, apéndice

4.2 Diseño del experimento

Como ya se mencionó anteriormente, el camino para llegar a la base para margarina a partir del fraccionamiento de aceite de palma ya está establecido. En ambos procesos, 2Fy 3F, se harán una serie de corridas variando las curvas de enfriamiento hasta llegar a una curva óptima que produzca al sustituto en cuestión. La curva utilizada para obtener oleína y estearina de palma será la misma para ambos caminos y es la curva que generalmente se utiliza en esta etapa del proceso en la industrial. De igual forma, en el proceso 3F, la obtención de la oleína dura (PF: 32–34), se conseguirá utilizando la curva que generalmente se utiliza en la industria de aceites y grasas.

El proceso de cristalización tiene una serie de 10 pasos, en los cuales las variables a manejar son el tiempo y la temperatura, siendo estas las que conforman la curva de cristalización. Cada paso tiene una temperatura y un tiempo respectivo, previamente estipulado. Por ejemplo si un producto cualquiera necesita a una temperatura dada una gran cantidad de grasa sólida, se le otorga un tiempo más largo a la curva de enfriamiento cuando está a esta temperatura. Pero si se requiere menor cantidad de grasa sólida a esta misma

temperatura, el tiempo de retención a esta temperatura será menor en la curva de enfriamiento. De esta manera se maneja el enfriamiento controlado dentro de la unidad de cristalización.

Las diferentes corridas se harán siguiendo las curvas de cristalización que se apuntan en las tablas siguientes:

Tabla V. Curvas de enfriamiento para la obtención del sustituto 3F, a partir de oleína dura PF: 33

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Paso	(°C)/(min)	(°C)/(min)	(°C)/(min)
1	80/5	80/5	80/5
2	50/5	50/5	60/5
3	50/5	50/5	55/5
4	48/30	45/30	50/35
5	42/20	37/20	42/20
6	38/40	26/40	35/40
7	30/50	22/50	32/50
8	26/50	20/50	28/50
9	22/120	18/120	25/120
10			

Tabla VI. Curvas de enfriamiento para la obtención del sustituto 2F, a partir de estearina PF: 49

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Paso	(°C)/(min)	(°C)/(min)	(°C)/(min)	(°C)/(min)
1	80/5	80/5	80/5	80/5

2	65/5	65/5	65/5	65/5
3	65/30	65/30	65/30	65/30
4	60/41	62/36	62/36	62/36
5	55/35	58/30	58/30	58/30
6	52/34	54/24	54/24	54/24
7	50/40	52/30	52/30	52/30
8	45/90	48/90	50/90	48/80
9	40/115	42/115	45/115	42/105
10				

4.3 Metodología

El presente estudio se basa en la determinación de una curva óptima de enfriamiento con la cual se logre desarrollar el sustituto de la base para margarina. Esto se evaluará con una serie de análisis fisicoquímicos de rutina realizados en la producción de oleína y estearina en una planta de fraccionamiento. Para la determinación directa de la eliminación de isómeros trans es necesario conocer directamente la proporción de ácidos grasos e isómeros presentes en el sustituto, lo cual se realiza por medio de la detección directa de metilésteres de glicerol en cromatografía de gas. El procedimiento se detalla a continuación:

Procedimiento 1:

Condiciones del Cromatógrafo de Gas :

Columna: SP 2380 Capillary Column 2 – 4152 , 30m x 0.25mm, 0.20 μ m FILM

- Gas: Nitrógeno a 6.0 psi

- Detector: FID 260°C
- Temperatura Inyector : 250°C
- Temperatura Horno: 180°C Isotérmica
- Start time : 0
- End Time : 25

Condiciones del Cromatógrafo de Gas :

- Temp 1 : 180°C
- Tiempo 1 : 25.00 min
- Initial temp : 250°C
- Press 1: 6.0 Psi

Preparación de muestras:

- La muestra se calienta para hacerla fluida y poder entonces saponificarla por medio de la adición de hidróxido de sodio, para liberar los ácidos grasos y luego convertir éstos a metil-ésteres de ácidos grasos; compuestos que pueden ser detectados a las condiciones del equipo y características de la columna. (METODO OFICIAL AOCS Ce – 1-62)

Detección de ácidos grasos:

- Los tiempos en que cada uno de los ácidos grasos es retenido se describe a continuación:

Tabla VII. Tiempos de retención de ácidos grasos.

ÁCIDO GRASO	TIEMPO (min)
CAPROICO	5.700
CAPRÍLICO	5.900
CAPRICHICO	6.200
LAURICO	6.650
MIRÍSTICO	7.700
MIRISTOLEICO	8.300
PENTADECANOICO	8.700
PALMÍTICO	9.400
PALMITOLEICO	10.300
MARGÁRICO	10.600
MARGAROLEICO	11.500
ESTEARICO	12.500
OLEICO	14.00
LINOLEICO	16.00
LINOLENICO	19.00
ARAQUÍDICO	22.303
GADOLEICO	23.000
BEHENICO	26.490
ERÚCICO	30.138

Fuente: Hui Y. H. *Bailey's Industrial Oil & Fat Products*. Pág. 102

Para determinar si el sustituto desarrollado cumple con los requisitos de calidad de la base margarina, Se realizará el análisis de contenido de grasa sólida por medio de la resonancia magnética nuclear. El NMR (Resonancia

Magnética Nuclear) determina la proporción de triglicéridos sólidos aceite o grasas, a las temperaturas a las que fueron tratadas las mezclas.

- Materiales
 - Cristalería: 5 tubos de vidrio Pyrex o Kimax, 10mm diámetro externo, 9.65 ± 0.13 diámetro interno x 75mm de largo mínimo.
Beaker de 250ml.

- Equipo
 - Estufa: Analizador NMR BRUKER NMS 120 minispec; baños a temperatura constante HAAKE CH; balanza Analítica

- Reactivos
 - Ninguno

- Procedimiento
 - Se funde la muestra en la estufa hasta llevarlo a 100°C aproximadamente manteniendo la temperatura durante 10 minutos. Filtrar la muestra.
 - Llenar 5 tubos de vidrio con la muestra con una altura de 40mm y tapar los tubos.
 - Colocar los tubos llenos en uno de los baños a 70.0°C durante 30 minutos y luego a otro baño con agua a 0.0°C durante 1 hora .
 - Colocar un tubo en cada uno de los baños a las siguientes temperaturas 10.0, 21.1, 26.7, 33.3 y 40.6°C.
 - Calibrar el NMR utilizando los tubos preparados con soluciones estándar de 0.0, 31.5 y 73.7 % de contenido sólido.
 - Leer el porcentaje de grasa sólida en el NMR.

Para los análisis complementarios se utiliza índice de yodo (procedimiento 2) y punto de fusión de Wiley (procedimiento 3).

Procedimiento 2:

Se basa en el tratamiento de la muestra con una solución que permite romper los dobles enlaces presentes a causa de la insaturación natural o producida en el aceite, para luego enlazar yodo en éstos puntos y asegurar la presencia de este elemento en forma excesiva, cantidad que luego es titulada con tiosulfato de sodio, comparando los resultados contra un blanco de reactivos. (METODO OFICIAL AOCS Cd 1-25)

Procedimiento 3:

El procedimiento de análisis se basa en congelar una tableta de la grasa de dimensiones conocidas a una temperatura estándar para luego colocarla en una mezcla agua-alcohol en baño María, permitiendo controlar el incremento de la temperatura hasta observar la transformación de la tableta grasa en un cuerpo líquido esférico. Se controlan las temperaturas de la mezcla en contacto con la grasa así como la temperatura del baño, la diferencia entre ambas no ha de variar más de 1.5°C. (METODO OFICIAL AOCS Cc 2-38 MODIFICACION AOAC)

5. RESULTADOS

Tabla VIII. Contenido de grasa sólida de los sustitutos (NMR)

	2F	3F
	Prueba 4	Prueba 2
% de sólidos a 10.0°C	71.72	76.65
% de sólidos a 21.1°C	36.77	51.58
% de sólidos a 26.7°C	15.93	31.32
% de sólidos a 33.3°C	6.88	14.47
% de sólidos a 40.6°C	2.74	3.64

Fuente: Reporte de análisis, laboratorio, control de calidad, Olmeca S.A. Sección: Apéndice

Tabla IX. Análisis fisicoquímicos de los sustitutos (AOCS)

	2F	3F
Propiedad fisicoquímica	Prueba 4	Prueba 2
Punto de fusión (°C)	41	42.8
Índice de yodo (wijs)	43.3	39.79

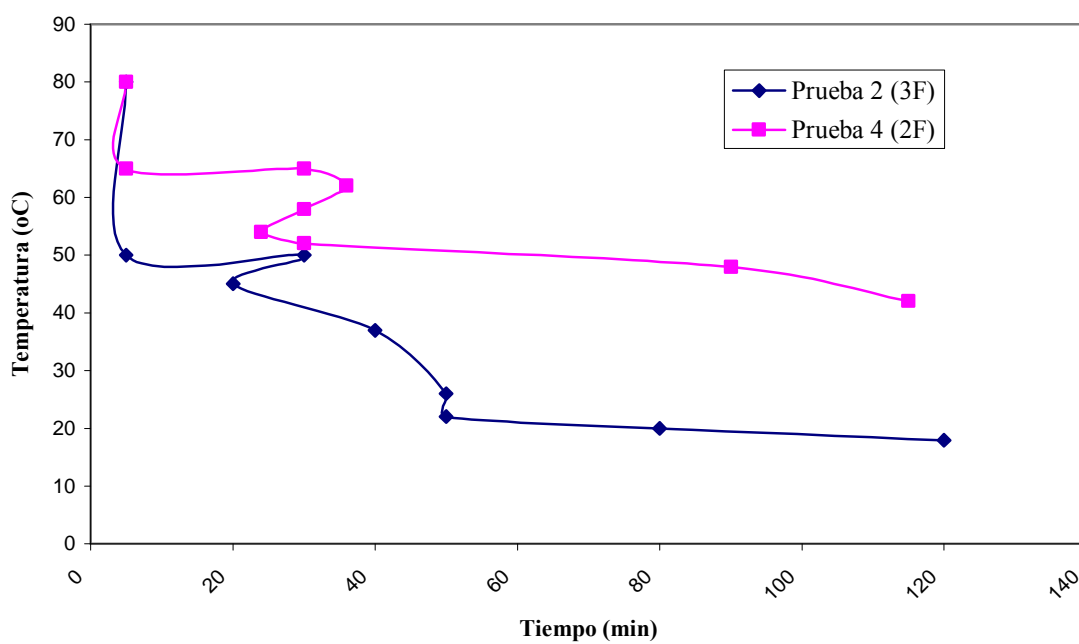
Fuente: Reporte de análisis, laboratorio, control de calidad, Olmeca S.A. Sección: Apéndice

Tabla X. Perfil cromatográfico de la prueba 4 del proceso 2F.

Ácidos grasos	Composición (%)
Ácidos saturados	58.82
Ácidos monoinsaturados	35.06
Ácidos poliinsaturados	6.12
Isómeros Trans	--

Fuente: perfil cromatográfico, base para margarina hidrogenada, apéndice

Figura 10. Curvas de enfriamiento óptimas.



Fuente: Sección "Diseño del experimento"

Tabla XI. Rendimientos experimentales

	2F	3F
	Prueba 4	Prueba 2
Rendimiento (%)	25.26	14.67

Fuente: Datos experimentales

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo se evaluó la factibilidad técnica de obtener una base para margarina libre de isómeros trans a partir del fraccionamiento del aceite de palma africana, esto para poder sustituir a la base para margarina producida mediante el proceso de hidrogenación, por medio cual se generan los isómeros en cuestión. Esto se logró mediante la determinación de una curva óptima de enfriamiento en la unidad de cristalización.

El proceso de fraccionamiento es un proceso de separación física que consiste en un enfriamiento controlado de aceite de palma africana refinada físicamente con el objetivo de separar la fracción líquida de la fracción sólida por medio de filtración⁴. El fraccionamiento se logra con el uso de unidades de cristalización, en las que el aceite de palma refinado físicamente es introducido a cierta temperatura, que se hace descender gradualmente y de forma automática para generar la adecuada enucleación, que permite obtener posteriormente, con el uso de un filtro hidráulico de tipo prensa (de membranas), que trabaja a alta presión, las fracciones líquida y sólida, de tal modo que la fracción líquida escapa a través de las placas del filtro y la fracción sólida queda atrapada dentro de ellas.

En las unidades de cristalización se manejaron dos variables: la temperatura y el tiempo, las cuales se hicieron variar para de este modo generar los diferentes núcleos de cristalización óptimos para extraer a los

⁴ 1996 PORIM International Palm Oil congress. "Competitiveness for the 21st century", pág. 345

triglicéridos aptos para el propósito de este trabajo. Es decir, los triglicéridos que le dieran al producto las características propias de una base para margarina hidrogenada. Y como ya se ha mencionado, el aceite de palma africana tiene en su composición, una gran variedad de ácidos grasos que se diferencian entre sí debido a sus diferentes niveles de saturación o insaturación, es por eso que es el insumo fundamental para producir bases para margarina a través del proceso de fraccionamiento. En la unidad de cristalización se dio énfasis a una serie de temperaturas, en las cuales las bases son analizadas para determinar el contenido de grasa sólida por medio de resonancia magnética nuclear. El tiempo a una temperatura determinada en la curva de enfriamiento, tiene una relación directamente proporcional a la generación de núcleos de cristalización de triglicéridos que tengan un punto de congelación cercano a dicha temperatura. En la fase experimental se realizaron pruebas de dos y de tres fraccionamientos. Obviamente, mientras más fraccionamientos se realicen, más puntual será la base producida, pero más altos serán los costos, razón por la cual, se trabajó manteniendo una relación técnico-económica con respecto al número de fraccionamientos realizados sobre un mismo batch de aceite de palma africana.

Por medio del proceso de dos fraccionamientos (2F), donde el camino a seguir se muestra en la figura 8, se obtuvo una base para margarina suave, mientras que del proceso de tres fraccionamientos (3F), donde el camino a seguir se muestra en la figura 9, se obtuvo una base para margarina dura. Esta diferencia se puede apreciar al comparar la cantidad de grasa sólida de dichas bases de la tabla VII de la sección de resultados, con la tabla II de la sección de desarrollo del experimento. Esta diferencia en el contenido de grasa sólida se da debido a que en el proceso 2F aún existe una cantidad significativa de triglicéridos con un nivel alto de insaturación, mientras que en el proceso 3F, donde se parte del punto donde termina el proceso 2F (ver figuras 8 y 9) se

separan los triglicéridos insaturados en exceso. Siendo más largo el proceso 3F, pero teniendo como resultado una base para margarina más saturada. Ambas bases para margarina pueden ser útiles dentro de la industria de aceites y grasas comestibles. La base dura puede servir para margarinas que no necesiten refrigeración o climas cálidos, mientras que la base suave encontrará su aplicación para margarinas que necesiten refrigeración o climas templados.

Ahora bien, si se observa la tabla IX de la sección de resultados, donde se exponen las propiedades físicas y químicas de las bases en cuestión, se puede apreciar que la base 3F cumple con todas las propiedades fisicoquímicas (punto de fusión e índice de yodo) de una base para margarina dura, expuestas en la tabla III de la sección de desarrollo del experimento. Es decir, se logra producir a partir del fraccionamiento de aceite de palma africana, una base para margarina dura exacta a la base para margarina hidrogenada dura. Pero por otro lado la base producida por medio del proceso 2F, únicamente cumple con el punto de fusión y no así con el índice de yodo, el cual refleja el nivel de saturación. El índice de yodo de un producto graso tiene un comportamiento directamente proporcional al nivel de insaturación de dicho producto. Entonces cómo es posible que la base para margarina suave obtenida por medio del proceso de fraccionamiento tenga aproximadamente el mismo contenido de grasa sólida con respecto a una base para margarina hidrogenada suave, pero teniendo un índice de yodo más bajo, es decir, un nivel de saturación más alto. La razón son los ácidos grasos en su configuración trans presentes en la base para margarina suave hidrogenada. Los isómeros trans son estructuras artificiales que el organismo no reconoce fácilmente, e interfieren con el normal metabolismo lipídico o se acumulan en las células adiposas.

Los ácidos grasos insaturados están comúnmente presentes en la naturaleza en su configuración cis, pero adquieren su configuración trans por medio del proceso de hidrogenación. Dicho proceso se utiliza para producir bases para margarina a partir de la saturación de aceites vegetales. La presencia de ácidos grasos en su configuración trans en la base para margarina hidrogenada se puede apreciar al observar la tabla IV de la sección de desarrollo del experimento. Mientras que el análisis cromatográfico realizado a la base para margarina suave obtenida del proceso 2F muestra la ausencia de dichos isómeros (ver tabla X).

Los isómeros son dos o más moléculas con composiciones químicas idénticas, pero que difieren en la disposición de los átomos⁵. Dos sustancias isómeras pueden diferir en sus propiedades físicas, químicas y biológicas: una puede ser una medicina útil y la otra ineficaz, una inofensiva y la otra explosiva. El ácido oleico (C18:1n9cis), líquido a temperatura ambiente, ampliamente presente en el aceite de palma africana es un ácido graso monoinsaturado. Mientras que su isómero, el ácido elaídico (C18:1n9trans) presenta una estructura sólida a temperatura ambiente más parecido a un ácido saturado que a uno insaturado, pero mantiene el doble enlace. Al realizar el análisis de índice de yodo, éste solamente detecta la insaturación no diferenciando si está en su configuración cis o trans.

Por esto la base para margarina suave obtenida por medio del fraccionamiento tiene un índice de yodo más bajo que la base para margarina hidrogenada. La base obtenida por medio de fraccionamiento tiene un nivel de saturación mayor debido a la separación de una cantidad significativa de ácidos grasos insaturados. Por otro lado, el nivel alto de insaturación que indica el

⁵ WINGROVE, Alan S. Y Robert L. Caret. Química Orgánica. Pág 678.

índice de yodo de la base para margarina hidrogenada, es el reflejo de los ácidos grasos insaturados en su configuración trans. Razón por la cual ambas bases tienen aproximadamente el mismo contenido de grasa sólida pero difieren en su nivel de saturación.

La figura 10 de la sección de resultados muestra las curvas óptimas de enfriamiento, las cuales se utilizaron en los procesos 2F y 3F para poder obtener las bases en cuestión. En el proceso 2F se alcanzó un rendimiento del 25% mientras que en el proceso 3F se generó un rendimiento del 14%. Esto a partir de un batch de aceite de palma africana de 8000kg.

7. CONCLUSIONES

1. Técnicamente es factible obtener una variedad de bases para margarinas libres de isómeros trans, a partir del proceso de fraccionamiento de aceite de palma africana, dependiendo del nivel de saturación que se desee obtener.
2. A partir del aceite de palma africana, se pueden trazar una serie de caminos de fraccionamiento, para obtener toda una gama de productos grasos saturados e insaturados. Los caminos establecidos y las curvas de enfriamiento propuestos en este trabajo de graduación, son una herramienta de operación que permite la producción de sustitutos de las bases para margarina producidas por medio del proceso de hidrogenación.
3. Las curvas de enfriamiento presentadas en la sección de resultados, provocaron que se generaran en la unidad de cristalización, los núcleos de cristalización óptimos de triglicéridos, para obtener las bases para margarina en cuestión.
4. Con el desarrollo de los caminos de fraccionamiento y las curvas de enfriamiento, se logra estandarizar el proceso de fraccionamiento para garantizar la producción del sustituto libre de isómeros trans de la base para margarina hidrogenada en una planta de fraccionamiento industrial de una industria de aceites y grasas comestibles.

5. La ausencia de ácidos grasos insaturados en su configuración trans, se comprobó mediante un análisis químico por cromatografía. Teniendo como resultado un 58.82% de ácidos grasos saturados, un 35.06% de ácidos grasos monoinsaturados, un 6.12% de ácidos grasos poliinsaturados y por último una presencia negativa de ácidos grasos insaturados en su configuración trans.

6. La base para margarina suave (2F) alcanzó un rendimiento del 25% mientras que la base para margarina dura (3F) alcanzó un rendimiento del 14%. Esto a partir de un lote de aceite de palma africana de 8,000kg.

8. RECOMENDACIONES

1. El proceso de fraccionamiento tiene un alto potencial en la industria de aceites y grasas comestibles, es por eso que este proceso debe explotarse para poder sacarle el máximo provecho a la materia prima que en este caso es el aceite de palma africana.
2. Darle seguimiento en el ámbito industrial a los resultados arrojados por este trabajo de graduación, ya que desde el punto de vista económico, la producción de una base para margarina por medio del proceso de fraccionamiento, eliminaría paulatinamente el proceso de hidrogenación, lo cual constituiría un ahorro considerable en los costos de producción para la industria de aceites y grasas de Guatemala.
3. Evaluar la posibilidad de que así como se pudo obtener productos altamente saturados, a partir del aceite de palma africana mediante el proceso de fraccionamiento, también se podría obtener productos altamente insaturados, los cuales podrían competir y encontrar su aplicación dentro del mercado de aceites y grasas.
4. Evaluar económicamente la producción de bases para margarina, a partir del fraccionamiento de aceite de palma africana, para de esta manera determinar si es factible sustituir el proceso de hidrogenación por el proceso de fraccionamiento.

9. BIBLIOGRAFÍA

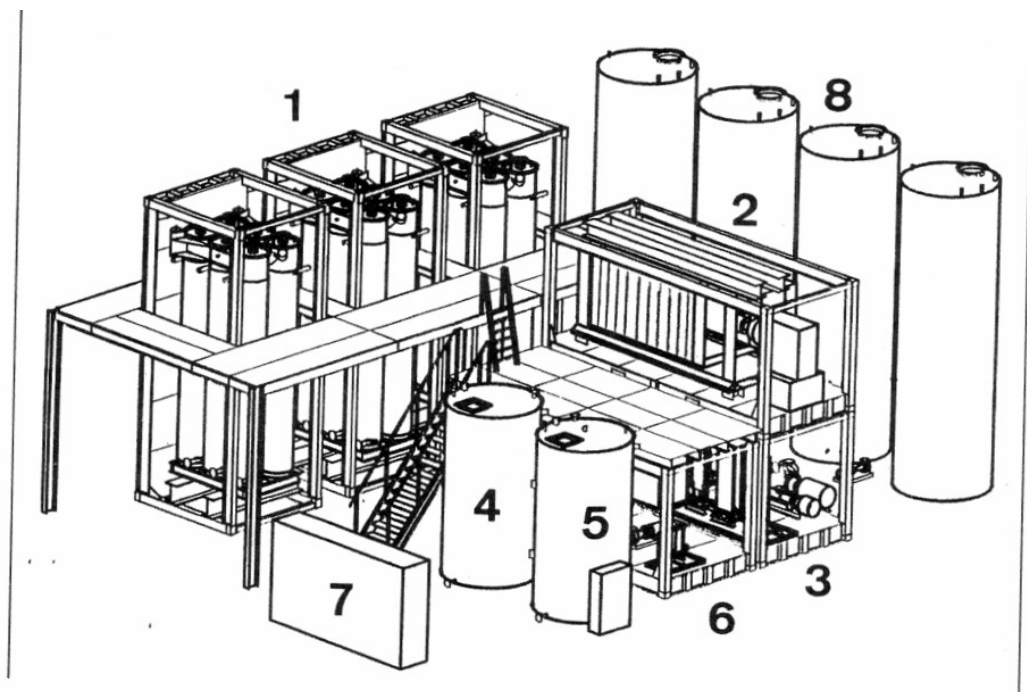
1. HUI Y.H. ***Bailey's Industrial Oil & Fat Products. Volume 4 Edible oil & Fat Products: Processing Technology.*** 5th. edition E.E.U.U. 1996.
2. ERICKSON, Ph. D David R. ***Formulation of Margarine and Shortenings for Specific Uses with a Base Stock Program.*** Edition American Soybean Association. E.E.U.U 1-8. 1994.
3. LÓPEZ Castellanos, Oscar Gerardo. Manual de Operación y Mantenimiento del equipo de Cristalización de Mantecas en una Industria de Aceites y Grasas. Tesis Ing. Químico. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1999.
4. SAMPERIO, Ing. José Manuel. **Glosario de Términos para la Industria Aceitera.** Asociación Americana de Soya. (México), (Cat. No.78): 1996.
5. ***STANDARD methods for the analysis of oils, fats and derivates. International Union of Pure and Applied Chemistry.*** 7th. edition. Blackwell Scientific Publications. IUPAC Method 2.205. (USA): 1987
6. WINGROVE, Alan S. y Robert L. Caret. **Química Orgánica.** México. Editorial Harla. 1984.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HUI Y.H. ***Bailey's Industrial Oil & Fat Products. Volume 4 Edible oil & Fat Products: Processing Technology.*** 5th. edition U.S.A. Edited By Y.H. Hui, 1996.
2. WINGROVE, Alan S. y Robert L. Caret. **Química Orgánica.** México: editorial Harla. 1984.
3. PORIM ***"1996 PORIM International Palm Oil Congress, Competitiveness for the 21st. century"*** Malaysia 1996. Palm Oil research Institute of Malaysia.
4. ORDOVAS, José. **Ácidos trans, lípidos plasmáticos y enfermedades coronarias.** Asociación Americana de Soya. Méjico 2002.

ANEXOS

Figura 11. Esquema de la planta de fraccionamiento industrial



Fuente: PORIM. *International Palm Oil Congress, Competitiveness for the 21st century.*
Pág 313

1. Cristalizadores.
2. Filtro prensa hidráulico.
3. Compresor Freón (enfriador de agua)

4. Tanque de recuperación de oleína.
5. Tanque de oleína de limpieza.
6. Sistema de bombeo.
7. Panel de control.
8. Tanques de aceite de palma africana refinado.