



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE HIDROGENACIÓN CATALITICA DEL
ACEITE DE PALMA AFRICANA EN UNA EMPRESA
PRODUCTORA DE ALIMENTOS**

Tutor Académico: Prof. Vanessa Altomare
Tutor Industrial: Ing. Luis Castillo

Autores:
ALVAREZ, Aldreina
BARCO, Juvely

Valencia, Octubre de 2008



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA



CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado titulado: **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE HIDROGENACIÓN CATALITICA DEL ACEITE DE PALMA AFRICANA EN UNA EMPRESA PRODUCTORA DE ALIMENTOS**, realizado por las bachilleres Aldreina Alvarez y Juvely Barco, portadoras de las cédulas de identidad N° 17.593.906 y 16.866.639 respectivamente, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo, y que no nos hacemos responsables de su contenido, pero lo encontramos correcto en su forma y presentación.

Prof. Vanessa Altomare
Presidente

Prof. Katuska Franceschi
Miembro del jurado

Prof. Ysmel La Rosa
Miembro del jurado

Valencia, 23 de Octubre 2008.



DEDICATORIA

A Jehová nuestro Dios todopoderoso, por su bondad amorosa y por darnos fortaleza para luchar hasta alcanzar nuestra meta, a él se de toda la gloria y honra que merece por ser nuestro creador y padre celestial..

A nuestros padres por su amor, dedicación y constancia en hacer de nosotras lo que somos hoy día, a ustedes les otorgamos este logro, recíbanlo como una pequeña recompensa por todo lo que han dado por nosotras.

A nuestros hermanos y demás familiares, por el apoyo brindado a lo largo de esta carrera y ser una mano amiga cuando más lo necesitamos.



El presente trabajo comprende una evaluación del proceso de hidrogenación del aceite de palma africana y los equipos de reacción, al igual que la formación de isómeros trans. Este trabajo se desarrolló en una empresa productora de alimentos.

A lo largo de su desarrollo se determinaron las especificaciones fisicoquímicas del aceite como materia prima y desodorizada, al igual que los hidrogenados. Esta investigación se realizó en cada una de las etapas del proceso de hidrogenación, entre las cuales están la carga del aceite a los reactores, donde se lleva a cabo la hidrogenación, el calentamiento, enfriamiento y la filtración. Los sistemas utilizados para la hidrogenación son el reactor Buss y el D'smet que tienen funcionamientos distintos. La metodología que se llevó a cabo consistió, en evaluar cada una de las etapas del proceso de manera de verificar si estas influyen en la calidad del aceite, al igual que medir el contenido de grasas trans en el aceite bajo las condiciones usuales de operación, y determinar si estas se encuentran dentro de los parámetros exigidos por la norma establecidas, ya que el consumo de grasas que contienen este tipo de isómeros, generan enfermedades con efectos adversos sobre la salud del consumidor. Debido a esto se plantearon propuestas, de manera de seleccionar la alternativa más adecuada y necesaria que conlleve a una mejora en el proceso, empleando herramientas metodológicas.

Entre las conclusiones más resaltantes de esta investigación, se tiene que la materia prima y la desodorizada cumplen con los requisitos de calidad establecidos por la norma Covenin, de manera distinta resulta para las bases hidrogenadas, ya que los isómeros trans resultaron muy elevados en comparación con los parámetros de calidad establecidos para el producto final. De allí la importancia de controlar la generación de isómeros trans, que se forman debido a las altas temperaturas a la que se expone la carga durante la hidrogenación, a la baja presión de hidrógeno y al catalizador reutilizado que contiene azufre y se encuentra envenenado. Por otra parte, es necesario disminuir el tiempo invertido en las etapas del proceso de hidrogenación, para obtener diariamente una mayor cantidad de cargas, cumpliendo así con la demanda del cliente.

Figura

1.1	Proceso de hidrogenación del aceite de palma.	5
2.1	Diagrama de la estructura molecular de distintos ácidos grasos.....	18
2.2	Rutas que siguen un doble enlace durante la hidrogenación.....	22
2.3	Fruto de la Palma	26
2.4	Diagrama de bloque del proceso de hidrogenación del aceite de palma en el convertidor D'smet.....	33
2.5	Diagrama de bloque del proceso de hidrogenación del aceite de palma en el reactor Buss	34
2.6	Diagrama de flujo del proceso de hidrogenación del aceite de palma en el convertidor D'Smet.....	39
2.7	Diagrama de flujo del proceso de hidrogenación del aceite de palma en el reactor Buss.....	40
2.8	Enfriamiento de la carga hidrogenada por el Convertidor D'smet.....	41
2.9	Enfriamiento de la carga hidrogenada por el Reactor Buss.....	42
2.10	Mecanismo de reacción de la hidrogenación en presencia de catalizador.....	47
2.11	Reacción típica de hidrogenación en ausencia de catalizador....	47
2.12	Sistema de reacciones envueltas en la hidrogenación de un triglicérido.....	48
4.1	Diagrama Causa-Efecto.....	69
4.2	Fallas frecuentes ocurridas en el proceso de hidrogenación.....	70
4.3	Cromatograma de la palma cruda.....	72
4.4	Cromatograma de la palma desodorizada	73
4.5	Cromatograma de la palma hidrogenada por el Buss (lote 1).....	74
4.6	Cromatograma de la palma hidrogenada por el Buss (lote 2).....	75
4.7	Cromatograma de la palma hidrogenada por el D'smet (lote 1).....	76
4.8	Cromatograma de la palma hidrogenada por el D'smet (lote 2).....	77



INTRODUCCIÓN.....	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Formulación del problema.....	6
1.2.1 Situación actual	6
1.2.2 Situación deseada.....	6
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 General.....	7
1.3.2 Específicos.....	7
1.4 Justificación.....	8
1.5 Limitaciones.....	9
II. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	
2.1 Antecedentes.....	10
2.2 Marco teórico.....	13
2.3 Generalidades de grasas y aceites.....	13
2.4 Lípidos.....	13
2.5 Ácidos grasos.....	16
2.5.1 Ácidos grasos saturados.....	17
2.5.2 Ácidos grasos insaturados.....	17
2.6 Isomerización de las grasas y aceites	18
2.7 Manufactura de grasas y aceites comestibles.....	19
2.7.1 Desgomado.....	20
2.7.2 Blanqueo.....	20
2.7.3 Desodorización.....	21



Tabla

2.1	Contribución de los lípidos en tres atributos de los alimentos.....	15
2.2	Ácidos grasos saturados característicos en los aceites y grasas vegetales.....	16
2.3	Velocidades relativas de oxidación y de hidrogenación.....	23
2.4	Contenido de ácidos grasos en aceites de palma, palmiste y oleina de palma.....	27
2.5	Características de los aceites provenientes de la palma.....	28
2.6	Componentes menores del aceite de palma	29
2.7	Especificaciones de calidad para el aceite de palma procesado	31
3.1	Registros de tiempo perdido por fallas en el proceso de hidrogenación.....	63
4.1	Caracterización del aceite de palma crudo (materia prima) y desodorizado.....	67
4.2	Especificaciones de calidad del aceite de palma crudo.....	68
4.3	Porcentaje de isómeros cis y trans de la palma analizada.....	78
4.4	Comparación de las grasas trans de las muestras con los estándares de calidad.....	79
4.5	Flujo másico de aceite obtenido en los filtros catalíticos.....	88
4.6	Matriz de selección de las alternativas propuestas.....	90
4.7	Ingreso bruto.....	93
4.8	Capital fijo.....	93
4.9	Capital de trabajo e inversión.....	93
4.10	Costos de producción e Impuesto sobre la renta.....	93
4.11	Indicadores económicos de la alternativa.....	94
A.1	Variables experimentales en la etapa de hidrogenación del aceite de palma.....	105
A.2	Características fisicoquímicas de las cargas hidrogenadas del sistema Buss.....	106
A.3	Características fisicoquímicas de las cargas hidrogenadas del sistema D'smet.....	108
A.4	Características fisicoquímicas de las bases hidrogenadas del sistema Buss.....	110
A.5	Características fisicoquímicas de las bases hidrogenadas del sistema D'smet.....	111

A nivel agroindustrial es importante la producción del aceite de palma, ya que éste acompaña al hombre mucho más de lo que se imagina, en los hogares, las oficinas, los restaurantes y hasta los automóviles son depositarios de sus incontables usos, que crecen al ritmo de los inventos, la preocupación por las comidas sanas y la agitada vida moderna. Este sirve de manera especial en la fabricación de productos oleoquímicos como los ácidos grasos, ésteres grasos, alcoholes grasos, compuestos de nitrógeno graso y glicerol y en los últimos tiempos ha venido tomando fuerza su utilización como biocombustibles, se comprobó que el aceite también puede tener esa utilización, con grandes ventajas ambientales sobre los combustibles fósiles (petrodiesel). (Fedepalma, 2006)

La palma africana posee un fruto del cual se extrae un aceite comestible, este posee propiedades nutritivas y beneficiosas como lo son los carotenos, vitamina E, esteroides, fosfolípidos, glicolípidos y escualeno. Al aceite extraído se le mejoran sus características fisicoquímicas (olor, color, acidez, etc.) al ser sometido a un proceso denominado refinación física. Una vez que el aceite ha sido refinado pasa a la etapa blanqueo e hidrogenación, este proceso tiene como finalidad transformar los aceites líquidos en semisólidos o en sólidos, que son más fácilmente manejables y con una mayor vida de anaquel.

Existen varios factores que influyen en el proceso de hidrogenación, como la temperatura de operación, presión y volumen del hidrógeno suministrado, estos factores se deben mantener bajo condiciones controladas, ya que la desviación de dichas variables, trae como consecuencia la formación de ácidos grasos trans, los cuales inciden negativamente en la salud humana, debido a que generan enfermedades coronarias, infartos cardiovasculares, entre otros problemas de salud. Por tal motivo, la importancia de evaluar éste proceso y determinar si proporciona al consumidor propiedades nutritivas o por el contrario lo afecta. (Uauy., 2007)

Por todo lo antes expuesto, se llevo a cabo el presente trabajo de investigación que proporcionará a la empresa, la evaluación del proceso de hidrogenación con la finalidad de proponer diversas alternativas, que son posible implementar para lograr la mejora del proceso, y de esta manera incrementar la calidad del producto final y cumplir con las especificaciones establecidas, basándose en las necesidades actuales.

4.9	Cargas hidrogenadas del sistema Buss.....	80
4.10	Cargas hidrogenadas del sistema D'smet.....	81
4.11	Cargas hidrogenadas de los sistemas Buss y D'smet.....	82
4.12	Bases hidrogenadas en el sistema Buss.....	83
4.13	Bases hidrogenadas en el sistemas D'smet.....	84
4.14	Tiempos de las etapas involucradas en el proceso de hidrogenación del sistema Buss.....	85
4.15	Tiempos de las etapas involucradas en el proceso de hidrogenación del sistema D'smet.....	87
4.16	Medidor de caudal de hidrógeno.....	91
4.17	Diagrama de automatización del sistema Buss.....	97
4.18	Diagrama de automatización del sistema D'smet.....	98



A.6	Características fisicoquímicas de las muestras utilizadas en la determinación de isómeros cis y trans.....	112
B.1	Cotización de los instrumentos y accesorios para el sistema de automatización al implementar la alternativa C.....	113
C.1	Volumen corregido para la determinación del IGS	124

2.8 Hidrogenación de grasas y aceites.....	21
2.9 Aspectos nutricionales.....	25
2.10 Generalidades del aceite de palma africana.....	26
2.10.1 Composición y propiedades del aceite de palma.....	27
2.10.2 Impurezas y calidad del aceite de palma.....	29
2.11 Proceso de hidrogenación de palma africana.....	32
2.12 Etapas involucradas en el proceso de hidrogenación.....	35
2.12.1 Almacenaje.....	35
2.12.2 Tanques de carga.....	35
2.12.3 Intercambiadores de calor I y II.....	35
2.12.4 Sistema D'smet.....	35
2.12.5 Tanque de caída.....	37
2.12.6 Sistema Buss.....	37
2.12.7 Filtración catalítica.....	38
2.12.8 Almacenamiento de material hidrogenado.....	38
2.13 Aplicaciones alimenticias del aceite de palma.....	43
2.14 Catalizadores.....	44
2.14.1 Mecanismos y Reacciones involucradas en la hidrogenación.....	46
2.14.2 Factores que afectan la funcionalidad del Catalizador.....	48
2.14.3 Generalidades de los efectos del Níquel sobre el ambiente y la salud.....	49
2.15 Control de procesos.....	50
2.15.1 Determinación de la acidez.....	50
2.15.2 Índice de yodo.....	51
2.15.3 Índice de refracción.....	51
2.15.4 Determinación de color.....	51
2.15.5 Punto de fusión.....	52
2.15.6 Contenido de grasas sólidas.....	52
2.16 Flujos monetarios.....	53
2.16.1 Inversión inicial.....	53
2.16.2 Costos operacionales.....	53
2.16.3 Impuestos sobre la renta.....	53

III. MARCO METODOLOGICO REFERENCIAL

3.1 Análisis del proceso de hidrogenación del aceite de palma para identificar los factores y variables involucradas que influyen en dicho proceso..... 54

 3.1.1 Caracterización de las muestras..... 54

 3.1.2 Identificación de las variables involucradas en el proceso mediante la realización del diagrama Ishikawa y Pareto..... 56

 3.1.3 Selección de variables..... 60

3.2 Determinación de los isómeros cis y trans de la materia prima y bases hidrogenadas a fin de comparar con las especificaciones establecidas..... 60

3.3 Comparación del funcionamiento y operatividad de los sistemas Buss y D’smet para determinar las fallas existentes..... 61

 3.3.1 Recolección de datos..... 61

 3.3.2 Análisis del tiempo de procesamiento..... 62

3.4 Propuesta de alternativas a fin de mejorar el proceso de hidrogenación..... 63

3.5 Selección de las alternativas técnicamente factibles con la finalidad de mejorar el proceso..... 63

3.6 Evaluación económica de las alternativas seleccionadas para establecer una factibilidad de implementación..... 64

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Caracterización de la materia prima..... 67

 4.1.1 Análisis de las variables involucradas en el proceso..... 68

4.2 Determinación de isómeros cis y trans en la materia prima y bases hidrogenadas..... 71

4.3 Comparación de los sistemas de conversión Buss y D’smet de manera de identificar las fallas existentes en dichos sistemas..... 79

 4.3.1 Caracterización del producto hidrogenado..... 79

 4.3.2 Evaluación de las bases hidrogenadas de los sistema Buss y D’smet 82

 4.3.3 Comparación de las etapas del proceso de hidrogenación de los sistemas de conversión..... 84

 4.3.4 Filtros Catalíticos..... 87

4.4 Alternativas propuestas técnicamente.....	88
4.5 Descripción de las alternativas seleccionadas.....	90
4.6 Evaluación económica de las alternativas seleccionadas.....	92
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	101
APÉNDICES	
APÉNDICE A: Tablas de datos.....	105
APÉNDICE B: Cálculos típicos.....	113
APÉNDICE C: Pruebas de laboratorio.....	117
APÉNDICE D:	126

Tabla A.1. Variables experimentales en la etapa de hidrogenación del aceite de palma

Nº carga	Presión (Kgf/cm ²)	Temperatura de reacción (T ± 1) °C	
1	3,3	160	180
2	3,6	170	193
3	3,0	169	188
4	3,1	170	196
5	3,5	172	190
6	3,0	174	197
7	3,7	175	199
8	3,7	172	180
9	3,8	169	185
10	3,6	175	190
11	3,2	171	188
12	4,0	170	179
13	3,9	168	178
14	4,1	169	180
15	4,1	171	190
16	3,9	171	192
17	4,2	160	185
18	4,2	170	196
19	3,8	170	193
20	3,4	169	183
21	3,2	170	192
22	3,6	171	190

Tabla A.2. Características fisicoquímicas de las cargas hidrogenadas del sistema Buss

N° cargas	Punto de Fusión (T ± 0,2) °C	Índice de Refracción	Color (5 ¼’’ a/r/a)
HB-242	41,0	1,4510	50/5,0/0,6
HB-243	41,0	1,4510	51/5,1/0,8
HB-250	45,0	1,4501	59/5,9
HB-251	41,0	1,4510	79/7,9
HB-252	41,0	1,4510	64/6,4
HB-253	44,4	1,4502	60/6,0
HB-254	42,8	1,4509	52/5,2
HB-255	45,0	1,4502	50/5,5
HB-256	43,4	1,4504	52/5,2
HB-258	41,8	1,4508	51/5,2
HB-259	43,0	1,4507	58/5,8
HB-260	42,2	1,4510	70/7,0
HB-261	43,0	1,4508	52/5,2/0,3
HB-262	45,0	1,4501	43/4.3/0,1
HB-264	45,0	1,4501	41/4,1
HB-273	43,0	1,4508	44/4,1
HB-277	43,0	1,4505	52/5,2
HB-278	43,0	1,4506	44/4,4
HB-281	43,0	1,4509	54/5,4
HB-282	42,8	1,4509	49/4,9
HB-283	44,8	1,4505	50/5,0
HB-284	43,0	1,4503	52/5,2

Tabla A.2 (continuación). Características fisicoquímicas de las cargas hidrogenadas del sistema Buss

N° cargas	Punto de Fusión (T ± 0,2) °C	Índice de Refracción	Color (5 ¼" a/r/a)
HB-286			
HB-289	43,0	1,4502	47/4,7
HB-291	44,0	1,4505	53/5,3
HB-292	43,0	1,4503	68/6,8
HB-293	43,4	1,4504	67/6,7/0,9
HB-294	43,2	1,4508	58/5,8/0,8
HB-295	42,0	1,4508	57/5,7/1,0
HB-296	45,0	1,4505	50/5,07/1,0
HB-306	43,0	1,4506	45/4,3/0,3
HB-309	44,6	1,4502	58/5,8/1,0
HB-310	43,2	1,4504	50/5,0
HB-311	42,8	1,4503	52/5,2/0,5
HB-312	42,6	1,4504	53/5,3/0,5
HB-313	42,8	1,4504	62/6,2
HB-316	44,0	1,4502	61/6,1
HB-317	43,0	1,4506	67/6,7/1,6
HB-318	42,4	1,4508	52/52/0,6
HB-319	42,8	1,4509	50/5,0/0,4
HB-320	41,6	1,4508	58/5,8
HB-327	42,0	1,4510	58/5,8/1,0
HB-328	42,4	1,4510	59/5,9
HB-329	43,2	1,4503	50/5,0/0,8
	42,8	1,4510	44/4,0/0,8

Tabla A.3. Características fisicoquímicas de las cargas hidrogenadas del sistema D'smet.

N° cargas	Punto de Fusión (T ± 0,2) °C	Índice de Refracción	Color (5 ¼" a/r/a)
H-200	40,8	1,4511	51/5.1/0.8
H-208	43,0	1,4510	62/6.2
H-211	41,8	1,4510	60/7.2
H-212	43,6	1,4506	70/7.0
H-213	43,2	1,4508	80/8.0
H-214	43,4	1,4504	60/6.8
H-215	43,0	1,4504	61/6.1
H-217	44,0	1,4513	91/9.1
H-218	41,0	1,4510	70/7.0
H-219	43,0	1,4508	63/6.3
H-220	43,6	1,4505	44/4.4/0.2
H-222	44,0	1,4505	44/4.2
H-223	44,0	1,4505	42/4.2
H-233	43,4	1,4504	42/4.2
H-236	41,8	1,4508	54/5.4
H-237	41,0	1,4505	54/5,4
H-238	43,0	1,4506	50/5,0
H-239	41,8	1,4510	55/5,5
H-240	42,0	1,4507	53/5,3
H-244	43,4	1,4505	60/6,0
H-247	43,0	1,4505	70/7,8
H-248	43,4	1,4506	60/6,0
H-251	42,8	1,4505	69/6,9

Tabla A.3 (continuación). Características fisicoquímicas
de las cargas hidrogenadas del sistema D'smet.

N° cargas	Punto de Fusión (T ± 0,2) °C	Índice de Refracción	Color (5 ¼" a/r/a)
H-252	43,2	1,4504	70/7,0/0,9
H-253	42,0	1,4508	68/6,8/1,0
H-254	42,8	1,4508	62/6,2/0,6
H-255	42,0	1,4508	70/1,1/1,0
H-256	42,0	1,4508	68/6,8/0,8
H-266	44,2	1,4504	60/6,0/0,6
H-271	43,0	1,4503	51/5,1/0,6
H-272	43,2	1,4502	50/5,0
H-273	43,0	1,4502	56/5,6/0,5
H-274	44,0	1,4501	50/5,0/0,6
H-275	42,6	1,4505	60/6,0
H-276	42,8	1,4504	60/6,0
H-277	43,2	1,4505	52/5,2/0,5
H-278	43,2	1,4503	60/6,0
H-281	42,8	1,4508	66/6,6/1,8
H-282	44,0	1,4510	49/4,9/0,1
H-283	42,8	1,4510	48/4,8/0,5
H-291	43,2	1,4509	58/5,8/0,6
H-292	43,0	1,4505	50/5,0/0,8
H-298	42,6	1,4505	44/4,4/0,6
H-299	43,0	1,4505	44/4,4/1,0

Tabla A.4. Características fisicoquímicas de las bases hidrogenadas del sistema Buss

N° bases	Punto de Fusión (T ± 0,2) °C	% Sólidos					Índice de Refracción	Níquel	Color (5 ¼'' a/r/a)
		10°C	21.1°C	33.4°C	38°C	40.2°C			
1	42,9	41	28	15	7	5	1,4510	Negativo	68/6.8
2	44,6	48	26	21	12	9	1,4508	Negativo	52/5.2
3	42,0	40	27	13	9	7	1,4506	Negativo	57/5.7/0.3
4	43,6	50	39	21	13	2	1,4505	Negativo	46/4,6/0,1
5	42,8	45	32	16	10	8	1,4504	Negativo	51/5,1/0,4
6	44,0	55	46	21	13	10	1,4502	Negativo	60/6,0/0,3
7	42,8	41	26	15	9	6	1,4506	Negativo	63/6,3/0,3
8	44,6	43	30	16	10	7	1,4504	Negativo	53/5,3/0,6
9	42,4	50	38	20	11	9	1,4504	Negativo	51/5,1/0,6
10	43,4	43	30	16	9	6	1,4508	Negativo	52/5,2
11	42,6	43	30	15	8	6	1,4505	Negativo	53/5,3/0,3

Tabla A.5. Características fisicoquímicas de las bases hidrogenadas del sistema D'smet

N° bases	Punto de Fusión (T ± 0,2) °C	% Sólidos					Índice de Refracción	Níquel	Color (5 ¼'' a/r/a)
		10°C	21.1°C	33.4°C	38°C	40.2°C			
1	41,8	36	22	9	6	4	1,4510	Negativo	63/6.3
2	41,6	43	29	14	7	3	1,4508	Negativo	70/7.0
3	42,6	43	30	16	10	8	1,4510	Negativo	54/5.4/0.3
4	42,8	45	25	16	9	6	1,4503	Negativo	52/5,2/0,2
5	42,6	44	30	13	8	4	1,4504	Negativo	51/5,5/0,4
6	43,0	46	33	16	9	7	1,4505	Negativo	61/7,3/0,7
7	42,0	44	27	16	7	5	1,4509	Negativo	70/8,3/0,8
8	42,4	44	31	15	8	5	1,4505	Negativo	60/6,2/0,7
9	43,0	46	33	16	10	8	1,4505	Negativo	55/5,5/0,7
10	43,4	42	30	16	10	7	1,4508	Negativo	57/5,7/0,5
11	42,8	43	29	16	8	5	1,4508	Negativo	52/5,2/0,6

Tabla A.6. Características fisicoquímicas
de las muestras utilizadas en la determinación de isómeros cis y trans

Muestras	Identificación	Punto de Fusión (T ± 0,2) °C	Índice de Refracción	Color (5 ¼" a/r/a)
Cruda	PAC-013	45,0	1,4515	35/35
Desodorizada	PAD-025	45,0	1,4515	60/6,0/1,0
Hidrogenada sistema Buss	HB-355	42,0	1,4508	53/5,3
	HB-357	42,8	1,4505	64/6,4
Hidrogenada sistema D'smet	H-322	42,0	1,4506	60/6,4
	H-325	43,4	1,4504	68/6,8

En este capítulo se reseña la metodología empleada para cumplir con los objetivos de la investigación, así como el análisis de variables y recolección de datos necesarios para la resolución de los problemas planteados.

La presente investigación es de tipo evaluativa, debido a que se pretende analizar el proceso de hidrogenación del aceite de palma con el fin de proponer mejoras al mismo. Según su propósito y el origen de los datos es una investigación aplicada de campo, ya que los datos se recolectaran directamente del proceso tal y como ocurre en la realidad, a fin de establecer una asociación de los isómeros trans con las etapas del proceso, para poder realizar el presente trabajo.

Para el desarrollo sistemático de la investigación se plantean las siguientes etapas:

- ❖ Análisis del proceso de hidrogenación del aceite de palma
- ❖ Determinación de isómeros cis y trans del proceso
- ❖ Comparación de los reactores Buss y D'smet
- ❖ Propuesta de mejoras en el proceso de hidrogenación
- ❖ Selección de alternativas más adecuadas para el proceso
- ❖ Evaluación económica del proceso de hidrogenación

3.1- Análisis del proceso de hidrogenación del aceite de palma para identificar los factores y variables involucradas que influyen en dicho proceso.

3.1.1- Caracterización de las muestras

Los análisis realizados en la evaluación del aceite de palma, según las normas Covenin y Sampling and Analysis of Commercial Fats and Oils (A.O.C.S), establecidas por la empresa son las siguientes:

- ❖ Determinación del color:

Este método consiste en combinar filtros de color, hasta lograr el color que más se asemeje a la muestra a ensayar, como establece la Norma COVENIN 1191:1996.

❖ **Determinación del índice de refracción:**

Este método consiste en la determinación del índice de refracción por medida directa del ángulo de refracción, según la Norma COVENIN 702:2001.

❖ **Determinación del índice de fósforo:**

Este método permite determinar los fósforos o los equivalentes fosfátidos contenidos en una muestra de ceniza en presencia de óxido de zinc, seguido de la medida por espectrofotometría de fósforos como un complejo ácido azul fosfomolibdeno, como establece la Norma A.O.C.S Ca 12-55.

Alcance: aplicable al aceite vegetal crudo, desgomado y refinado.

❖ **Determinación del índice de yodo**

Es una medida de la insaturación de las grasas y aceites y se expresa en términos del número de centigramos de yodo absorbido por gramo de muestra, según la Norma COVENIN 324:2001.

❖ **Determinación del índice de grasa sólida:**

El índice de grasa sólida es una medida empleada del contenido de sólidos en una grasa. Este es calculado del volumen específico a varias temperaturas utilizando una escala graduada dilatométrica en unidades de ml x 1000, como establece la A.O.C.S Cd 10-57.

❖ **Determinación del punto de fusión: :**

El punto de fusión se basa en que los ácidos grasos puros y sus triglicéridos son polimórficos y son lo suficientemente estables como para mostrar diferentes puntos de fusión. La magnitud es obtenida mediante la solidificación de la muestra en un tubo capilar, en baño maría hasta alcanzar el esclarecimiento de la grasa, según la A.O.C.S Cc1-25.

3.1.2- Identificación de las variables involucradas en el proceso mediante la realización del diagrama Ishikawa y Pareto.

Una vez familiarizados con la sección de hidrogenación, mediante las visitas a la planta y la observación directa de los procesos, se logra identificar los posibles factores que afectan el funcionamiento y operación del proceso. Para obtener una mayor visión de los factores involucrados se realizó el diagrama causa-efecto o Ishikawa, el cual recomienda el uso de seis categorías esenciales llamadas las 6M las cuales son: método, maquinarias, materiales, mano de obra, medición y medio ambiente. Adicionalmente se realizó el diagrama de Pareto para reflejar los puntos críticos del proceso. Para la realización del diagrama causa-efecto se evaluaron las siguientes variables:

❖ **Mano de obra:**

Esta categoría incluye el personal operativo de la planta y los analistas del laboratorio, los cuales representan una parte importante para efectuar el proceso de hidrogenación. La falta de personal o experiencia, al igual que la fatiga y desmotivación, pueden ser causa de atraso en el proceso.

Los operadores deben tener conocimiento de las variables de control como presión y temperatura de los equipos, desempeñar correctamente sus funciones en el proceso de carga, calentar el aceite, controlar la inyección de hidrógeno, verificar que se encuentre dentro de las especificaciones el aceite de manera de garantizar la calidad del producto terminado y abrir y cerrar válvulas a lo largo del proceso. Por esta razón es importante que a nivel personal se encuentren motivados, reflejen una buena actitud y tengan un buen entrenamiento al ingresar a la planta.

En cuanto a los analistas, deben tener conocimientos de las pruebas a realizar tanto a la materia prima como al producto hidrogenado al igual que el manejo de los equipos, ya que la falta de experiencia y entrenamiento pueden influir negativamente en los resultados generando que el operador tome acciones erróneas.

❖ **Métodos**

En esta sección se evalúa cada una de las etapas del proceso de hidrogenación como lo son la carga, el calentamiento, la hidrogenación, el enfriamiento, la filtración y la descarga. Cada una de

estas etapas presenta diferentes procedimientos que deben efectuarse correctamente, ya que pueden llegar a influir en el proceso. Es necesario que cada una de estas etapas se realice en un orden específico y al momento indicado, para que no se altere la calidad del producto.

La carga del aceite se realiza en el tanque Romana, en el reactor Buss y en el tanque amortiguador. Una vez que el material es cargado se inicia la etapa de calentamiento, donde influye la cantidad de vapor suministrado y el tiempo necesario en alcanzar 160°C. Cuando el aceite ha alcanzado dicha temperatura, se procede a la hidrogenación, donde primeramente se adiciona el catalizador en forma sólida o mezclado previamente con aceite, facilitando así la disolución del catalizador en el aceite; el control de temperatura es importante en la adición del catalizador al reactor, ya que a temperaturas muy altas se podría dañar al aceite. La inyección de hidrógeno también es importante debido a que su calidad y presión a la que es suministrado podría generar que el aceite aumente la cantidad de ácidos grasos trans.

Después de la hidrogenación se procede a enfriar el aceite a una temperatura de 80°C, si se descarga el aceite hidrogenado a una temperatura mayor a esta, el aceite se puede oxidar y perder las propiedades adquiridas durante la hidrogenación, el tiempo de filtración también influye en la duración de elaboración de las cargas.

Por último influye el tiempo de filtración, donde las condiciones de los elementos filtrantes son parte esencial para el desarrollo de este.

❖ **Maquinarias**

Aquí se incluyen los factores relacionados con los equipos presentes en la sección de hidrogenación, tales como:

Bombas: el mantenimiento de las bombas es esencial en el proceso de hidrogenación, ya que el aceite que circula a través de ellas es viscoso y ensuciador.

Filtros: el material filtrante utilizado en los filtros como las lonas y el papel deben presentar un buen estado, se debe realizar un cambio periódico de estas a fin de obtener una mayor eficacia.

Intercambiadores de calor: son importantes debido a que la temperatura es un factor influyente en la reacción de hidrogenación, por lo tanto es necesario que su funcionamiento sea el adecuado. Actualmente estos intercambiadores poseen 124 tubos de los cuales 2 están rotos ocasionando así que el vapor se mezcle con el aceite y este se quemé, esto implica un aumento en los tiempos de procesos debido a que el calentamiento se realiza en los reactores. Por tal motivo no se emplean dichos equipos.

Amortiguador: en este equipo se almacena el aceite que va a ser alimentado al convertidor D'smet y cuenta con un serpentín de precalentamiento del aceite, el cual actualmente se encuentra fuera de servicio.

Reactor Buss: el funcionamiento del reactor se puede ver afectado por el intercambiador vertical, al igual que la inyección de hidrógeno. El intercambiador hace que el aceite alcance la temperatura adecuada, si éste se encuentra deteriorado o tapado podría ocasionar un aumento en el tiempo de calentamiento, así como también si el aceite no fue pasado por los intercambiadores horizontales.

Reactor D'smet: este equipo se puede ver afectado por el deterioro del serpentín interno, del agitador con el que cuenta y por la inyección de hidrógeno. Este reactor está recubierto por una chaqueta, la cual permite mantener la temperatura de reacción en el equipo y se transfiera el calor al aceite completamente.

❖ **Materiales**

En esta categoría se toman en cuenta los factores relacionados con la materia prima y sus especificaciones tales como:

Aceite de palma africana: a la cual se le realizan diferentes pruebas que deben satisfacer los requisitos que especifica control de calidad de Industrias Diana.

Hidrógeno: este se produce en la misma planta, mediante electrolisis y no se mide la pureza del mismo, debido a la falta de equipos destinados para tal fin.

Catalizador: el utilizado es a base de níquel con un contenido máximo de níquel de (20 a 27)% y su nombre comercial es Calsicat.

❖ Medio Ambiente

En esta sección se abarca todo lo referente al aspecto físico en la operación del proceso de hidrogenación, aunque no es una variable controlable, es importante considerar aspectos como los derrames, recolección de tierras y la limpieza. Ya que pueden ocasionar que el tiempo de proceso sea más del necesario.

❖ Mediciones

Se encuentran dentro de esta clasificación: los análisis fisicoquímicos a los que es sometido el aceite de palma antes y después de ser hidrogenado; igualmente se involucran la medición de la presión, volumen de hidrógeno, temperatura de reacción y tiempo de hidrogenación.

La presión y temperatura son variables importantes que deben medirse continuamente ya que a través de estas se puede controlar la velocidad de reacción y el proceso. El volumen de hidrógeno consumido es importante con respecto al costo del proceso, por su producción y gasto de electricidad que se genera cuando el tiempo de hidrogenación no es controlado. Por lo cual es necesario contar con un medidor de hidrógeno, que permita suministra la cantidad necesaria para la preparación de una determinada carga. Por ultimo se toma en cuenta el tiempo de hidrogenación, ya que con él se establece la duración de la reacción en el reactor, y el tiempo de contacto entre el catalizador, aceite e hidrógeno, necesarios para poder lograr un aceite dentro de especificaciones.

3.1.3- Selección de variables

La selección de variables se realizó tomando en cuenta los objetivos del presente trabajo, en función del análisis del diagrama causa-efecto se estableció y seleccionó las condiciones de operación.

Se tomaron en cuenta parámetros referentes al proceso de hidrogenación, como lo son el tiempo y los costos del proceso, además de la calidad del producto hidrogenado como el porcentaje de grasa sólida, el punto de fusión y la cantidad de grasas trans producidas.

3.2- Determinación de los isómeros cis y trans de la materia prima y bases hidrogenadas a fin de comparar con las especificaciones establecidas.

Se tomaron muestras de palma cruda y desodorizada, al igual que dos muestras de cada uno de los reactores Buss y D'smet, para determinar la cantidad de grasas trans que produce el proceso de hidrogenación. Los análisis se realizarán según la norma A.O.C.S Ce 1c-89, ya que esta determina los porcentajes de grasas trans. Se compararán los resultados con el contenido promedio de grasas trans de las margarinas en España, ya que para las bases hidrogenadas no hay una especificación establecida. La comparación se realizó tomando como base los porcentajes de grasas trans establecidas para margarinas suaves por los archivos latinoamericanos de nutrición 2007, ya que no existe un patrón establecido para bases hidrogenadas.

3.3- Comparación del funcionamiento y operatividad de los sistemas Buss y D'smet para determinar las fallas existentes.

3.3.1- Recolección de datos

Para la recolección de datos, se siguió un procedimiento experimental que permitió medir en campo las variables involucradas en el proceso las cuales se muestran en el diagrama causa-efecto, este se inició con la verificación de la operatividad y el funcionamiento de cada etapa del proceso. La toma de datos se realizó durante 3 meses de experimentación en un lapso de 8 horas

y el número de mediciones estuvo limitado por los cambios de materia prima, de acuerdo a los planes de producción de la empresa.

Las variables que no se lograron medir en campo, se calcularon a través de la aplicación de modelos matemáticos. La toma de datos se realizó tomando en cuenta la realización de cada objetivo y se desarrolló de la siguiente manera:

Muestreo:

- ❖ Se seleccionó el tanque de almacenamiento del aceite de palma cruda y desodorizada que alimenta el proceso.
- ❖ Se tomaron muestras del aceite de palma cruda y desodorizada para realizar los análisis de caracterización respectivos.
- ❖ Se cargó la romana con 7,5 toneladas de aceite desodorizado y se envió de acuerdo al equipo a utilizar al sistema Buss o D'smet.
- ❖ **Sistema Buss:** aplicando vacío en el reactor se procedió a calentar el aceite hasta alcanzar una temperatura de 160°C, seguidamente se adicionó el catalizador. Luego se inyectó hidrógeno y se comenzó a tomar el tiempo de hidrogenación.
- ❖ **Sistema D'smet:** la carga de la romana es enviada al tanque amortiguador del sistema D'smet, luego al convertidor donde se aplicó vacío dentro del mismo, donde se procedió a inyectar el hidrógeno y a tomar los tiempos de hidrogenación.
- ❖ Durante la reacción de hidrogenación, se tomaron muestras del aceite con el fin de determinar si el índice de refracción y punto de fusión estaban dentro de las especificaciones requeridas, de acuerdo a la base 42 que es la que evaluamos en esta investigación. Se tomó nota de la temperatura de reacción, así como la presión en el convertidor.
- ❖ Se tomaron muestras del aceite al final de la hidrogenación, para chequear en el laboratorio el índice de refracción, punto de fusión e índice de grasa sólida. Ya que estas variables indican cuando detener la hidrogenación.
- ❖ Se tomaron datos de temperatura en la torre de enfriamiento Marley, ya que este equipo es el que suministra el agua a los reactores para enfriar el aceite después de la hidrogenación.

- ❖ En la etapa de filtración se evaluó el comportamiento de este mediante cuantificar el flujo de aceite que pasa a través de este.

3.3.2- Análisis del tiempo de procesamiento

Se realizó una observación directa de cada una de las etapas del proceso de hidrogenación y las actividades realizadas por los operarios. Se recopilaron los datos del tiempo que se lleva en cada una de las etapas del proceso, los cuales se graficaron, a fin de generar un histograma de operación, que permita representar el desempeño operador / tiempo del proceso. Adicionalmente se realizó un diagrama de Pareto, para determinar las fallas mas frecuentes que ocurrieron durante la toma de tiempos en el proceso, indicando cual es el de mayor influencia.

En la tabla 3.1 se muestran las fallas ocurridas en el proceso, observándose que las mas relevantes son el calentamiento inadecuado del aceite, la baja presión de hidrógeno y los filtros obstruidos, los cuales ocasionan más tiempo perdido a lo largo del proceso. El porcentaje acumulado y relativo ayudan a la construcción del diagrama de Pareto representando a nivel porcentual el grado de ocurrencia de la falla. El porcentaje acumulado para cada elemento de la lista, se calcula con la suma de los porcentajes de contribución de cada uno de las causas anteriores más el porcentaje de la causa en cuestión.

Tabla 3.1. Registros de tiempo perdido por fallas en el proceso de hidrogenación

Causa de la falla	Tiempo perdido (h)	Porcentaje relativo (%)	Porcentaje acumulado (%)
Calentamiento inadecuado	20	26	26
Baja presión de hidrógeno	16	21	47
Filtros obstruidos	12	16	63
Tuberías obstruidas u ocupadas	10	13	76
Análisis del laboratorio	7	9	85
Material húmedo	5	7	92
Bombas averiadas	4	5	97
Otros	2	3	100

3.4- Propuesta de alternativas a fin de mejorar el proceso de hidrogenación.

En base a los resultados obtenidos después de procesar las variables que influyen en el proceso, en entrevistas al personal de la planta y personal con amplio dominio del tema, en investigaciones bibliográficas, en libros y en páginas web, se procedió a establecer una serie de alternativas de soluciones.

Cada una de estas alternativas fueron estudiadas desde el punto de vista de factibilidad de implementación económica, mediante matrices y técnicas de grupos. Seleccionando así, las alternativas que permitan mejorar o solventar problemas, carencias y debilidades operacionales presentes en el proceso de hidrogenación y que ofrezcan mejores resultados desde el punto de vista económico.

3.5- Selección de las alternativas técnicamente factibles con la finalidad de mejorar el proceso.

Para seleccionar la alternativa más adecuada, se utiliza una matriz de selección, tomando en cuenta los diferentes criterios que influyen en las propuestas. La selección se realizará mediante una ponderación que se le asignará a cada criterio, y será escogido el que obtenga mayor ponderación. Los criterios a evaluar son los siguientes:

- ❖ **Costos:** Está relacionado con la inversión total para la adquisición de los accesorios y equipos. Se debe tomar en cuenta que normalmente las empresas se inclinan por tecnologías o soluciones de menor costo de adquisición, es por ello que el presente criterio es el de mayor importancia dentro de la matriz de selección, y por ende la ponderación mayor será asignada al sistema de menor costo.

❖ **Vialidad técnica:** Consiste en evaluar que tan factible resulta la implementación de las alternativas, es importante resaltar que influye de manera directa la disponibilidad de la mano de obra y la duración que tendrá la instalación de las propuestas. Mientras más fácil de implementar sea la alternativa, mayor será el puntaje asignado.

❖ **Valor agregado:** Consiste en la contribución que proporcionarán las alternativas a la solución de los problemas que causan deficiencias en el proceso de hidrogenación, mientras la alternativa sea más significativa y contribuyente a las dificultades del proceso, mayor será la ponderación asignada.

❖ **Disponibilidad:** Está relacionado con la facilidad de obtención de los equipos y accesorios a instalarse, que se encuentren en el mercado. Mientras más accesibles estén los equipos, mayor será la ponderación asignada.

❖ **Mantenimiento:** Consiste en la complejidad del mantenimiento de los equipos y accesorios que conforman las alternativas, mientras mas complejo sea menor será el puntaje por los gastos económicos que requiere.

3.6- Evaluación económica de las alternativas seleccionadas para establecer una factibilidad de implementación.

En base a las alternativas seleccionadas suministradas por la matriz, se realiza una evaluación económica, a través de cotizaciones suministradas por las empresas especializadas, ya que estas suministran el costo total de inversión, al igual que los beneficios de implementación de cada alternativa. Igualmente se evalúa el tiempo estimado para la recuperación del capital invertido y los flujos monetarios, aplicando los modelos matemáticos que permitan la rentabilidad de la inversión, de esta manera conocer cual de estas resulta más factible de implementar a nivel económico. (Giugni, L; et all. 2007).

A continuación se da una breve descripción de cada uno de los flujos monetarios calculados:

- ❖ Inversión inicial: consiste en el dinero requerido para la obtención e implementación de las alternativas, esta se determina con la sumatoria del capital fijo total y el capital de trabajo.

$$Invinic = CF + CT$$

Donde:

Invinic: Inversión inicial (BsF)

CF: Capital fijo (BsF)

CT: Capital de trabajo (BsF).

- ❖ Costos operacionales: representan los costos de manufacturas y gastos generales y se calcula haciendo la sumatoria de estos.

$$CO = CM + GG$$

Donde:

CO: Costos operacionales (BsF)

CM: Costos de manufactura (BsF)

GG: Gastos generales (BsF).

- ❖ Impuestos sobre la renta (ISLR): son los tributos a cancelar a entes gubernamentales al ejecutar una actividad productiva. El ISLR se puede calcular empleando la siguiente ecuación:

$$ISLR = Tasa \times (E) - Sustruendo$$

$$(E) = \frac{(Ingresos - Costos_{operacionales} - Intereses_{deuda})}{Valor_{UT}}$$

Donde:

(E): enriquecimiento (BsF)

Tasa: tasa de interés fija (%)

Valor_{UT}: valor de la unidad tributaria (BsF).

- ❖ Cálculo de los indicadores económicos:

- Cálculo del valor actual (Va):

$$Va = -F_o + \frac{F_1}{(1+i)}$$

Donde:

F_o = inversión inicial (BsF)

F_1 = flujo monetario neto (BsF)

i = interés anual (%)

- El cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) se obtiene mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$TIR = \frac{F_1}{F_o} - 1$$

En esta sección se da a conocer el problema en estudio, indicando su descripción, así como también la situación actual y a la que se desea llegar. De igual manera se presentan los objetivos tanto el general como los específicos, la justificación, los alcances y limitaciones de la investigación.

1.1. Descripción del problema

Las grasas y aceites son consumidos en gran proporción, específicamente el aceite de palma, el cual posee un alto consumo a nivel mundial, siendo Malasia e Indonesia los países con mayor producción y diversidad de usos.

En Venezuela existen industrias productoras, procesadoras y comercializadoras de productos de consumo masivo tales como aceites, mantecas, margarina y jabones, que utilizan como materia prima el aceite de palma africana. Dichas empresas tienen sus propios cultivos de palma, plantas de extracción y refinación, que junto con la red de distribución estratégicamente ubicada a lo largo y ancho del país, reducen la dependencia generada por la importación de esta materia prima.

La palma cruda que ingresa a la planta es sometida a un proceso de refinación física, la cual tiene como fin disminuir el grado de acidez y fósforo presente en el aceite con el objeto de mejorar su calidad, eliminar la cantidad de gomas presentes y compuestos oxidantes, además de remover pigmentos que imparten color al aceite (carotenoides y clorofila).

En los productos alimenticios que se manufacturan a partir de grasas y aceites vegetales se tienen que cumplir con ciertas especificaciones para satisfacer las necesidades de los clientes y a su vez manteniendo la calidad de los productos, ya que en la rama de industrias de alimentos hay una gran competencia.

Para la obtención de estos productos es necesario aplicar una serie de procesos industriales,

entre ellos la hidrogenación es uno de los más importantes en la modificación de las características de las grasas.

El proceso de hidrogenación, como se muestra en la figura 1, comienza con la carga del aceite a un tanque de medición en el cual se alimenta la palma desodorizada previamente, luego se realiza un precalentamiento que va desde una temperatura de 60°C hasta aproximadamente 90 °C para facilitar tanto su transporte como el proceso de hidrogenación en sí. Para dicho calentamiento se emplean dos intercambiadores de calor de tubo y coraza en posición horizontal, donde el aceite se transporta por los tubos y el vapor por la coraza. Posteriormente el material es enviado al reactor en el cual se realiza la hidrogenación.

La planta en estudio cuenta con dos sistemas de hidrogenación Buss y D'Smet, que se pueden utilizar en paralelo o alternadamente, en esta etapa se adiciona el catalizador y se procede a inyectar el hidrógeno.

La hidrogenación consiste en la adición de hidrógeno a los dobles enlaces de las cadenas de los ácidos grasos que lo componen, en éste se permite la conversión de aceites en grasas semisólidas o plásticas e incrementa la estabilidad oxidativa de los mismos; a las bases hidrogenadas se le determinan las características fisicoquímicas específicas, donde el punto de fusión es uno de los más importantes, para el aceite de palma sus valores oscilan entre (43,6-45,0)°C; dependiendo del producto que se quiera obtener como margarinas y mantecas, tienen su parámetro de especificación.

El catalizador más empleado se prepara a base de níquel, el cual es una mezcla y presenta una concentración de níquel de (20-25) % p/p.

El aceite luego de ser enfriado pasa a una etapa de filtración catalítica, esta etapa se lleva a cabo en un filtro tipo prensa; éste posee un papel de filtro al cual se le realiza una pre-capa con aceite y ayuda filtrante con el fin de retener impurezas y la totalidad de catalizador.

Por último se almacenan las bases hidrogenadas en tanques que pueden poseer una capacidad de almacenamiento hasta de 6 cargas.

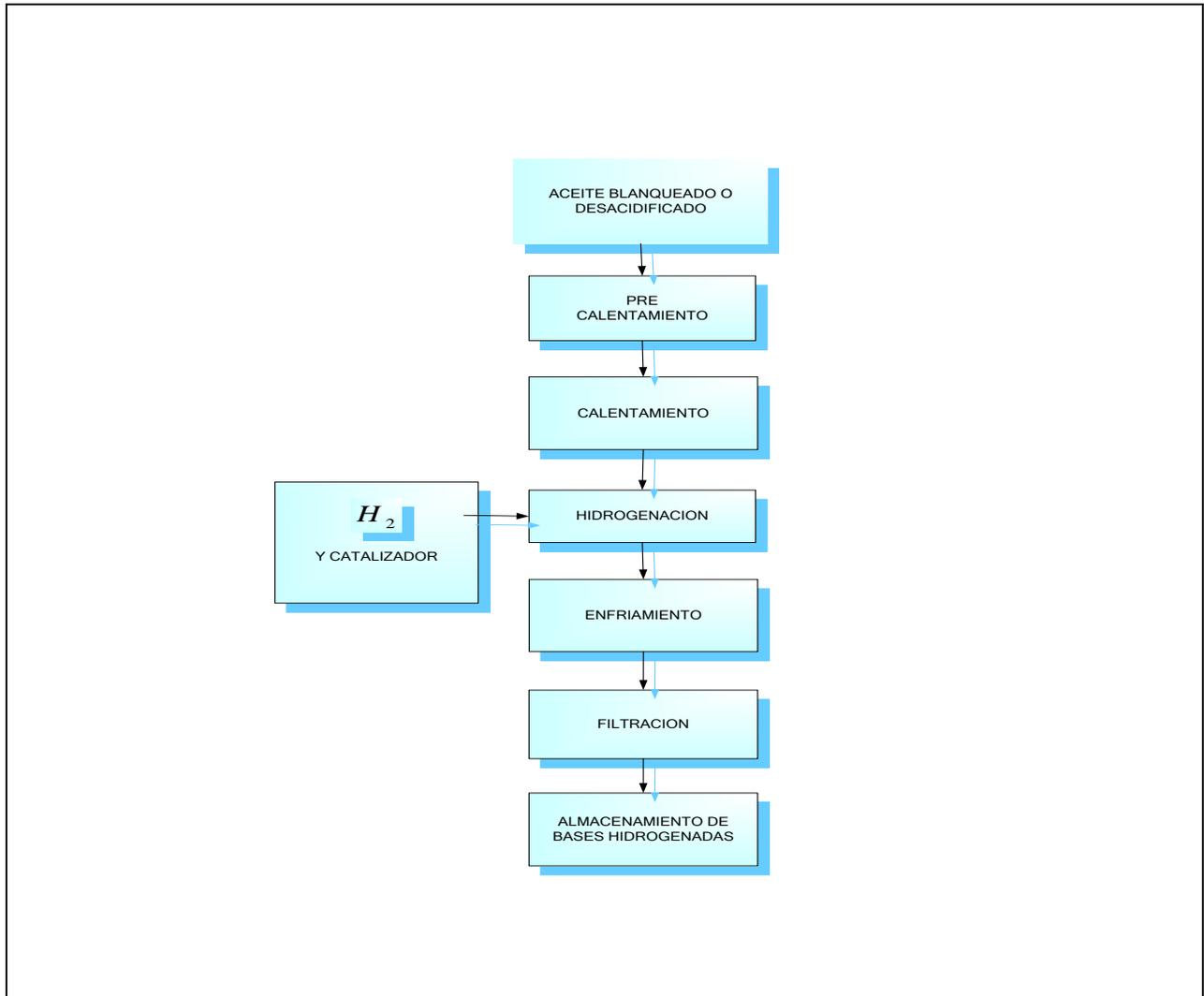


Figura 1.1. Proceso de hidrogenación del aceite de palma.

Fuente: Proceso de aceites en la industria, 2008

En la actualidad, especialmente en el proceso de hidrogenación, existen diferentes factores que pueden afectar la calidad de las cargas hidrogenadas y las bases producidas con éstas al igual que el producto final, entre los cuales se pueden considerar el inadecuado control de proceso, falta de adiestramiento del personal, obsolescencia en los equipos ya que no poseen sistemas de automatización confiables; además los equipos de medición e instrumentación no cuentan con un servicio de mantenimiento adecuado. Teniendo en cuenta esta situación y en la búsqueda de

ofrecer productos saludables y de calidad en el mercado, se plantea el mejorar el proceso con el fin de avanzar a nivel tecnológico y garantizar la calidad.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El proceso de hidrogenación posee diversas etapas, las cuales presentan características específicas que pueden verse afectadas por múltiples factores que influyen de manera negativa en la elaboración de cada carga y por ende en la producción de las bases hidrogenadas, debido a que algunas de estas etapas se llevan a cabo sin un adecuado control en el proceso. Es por ello que se requiere la evaluación y el planteamiento de alternativas que permita mejorar la eficiencia del proceso, al igual que garantizar la calidad de las bases hidrogenadas y del producto final.

1.2.1. Situación actual

En la planta a estudiar no existen controles que se consideren efectivos en las etapas del proceso de hidrogenación, lo cual ocasiona variabilidad en el proceso de elaboración y en los parámetros de calidad e identidad de las bases hidrogenadas y la calidad del producto. De tal forma si no se toman medidas para lograr una mejora en los procesos a través de una evaluación e implementación de soluciones adecuadas, le traería como consecuencia atraso a nivel industrial y dificultad para satisfacer las demandas de los clientes y obtener la calidad deseada.

1.2.2. Situación deseada

La industria oleoquímica cuenta con un estudio exhaustivo para mejorar el proceso de hidrogenación a través del análisis de los problemas que ocurren en éste, para así plantear e implementar alternativas y garantizar que el producto obtenido alcance las condiciones de calidad establecidas y los procesos se lleven a cabo con la menor variabilidad posible. De esta manera mantener y mejorar la calidad de sus productos, lo que los ha caracterizado hasta ahora; así como también ir progresando a nivel industrial siguiendo un plan estratégico competitivo.

En cuanto al alcance, se determinará cuáles son las mejoras que se deben implementar para

poder obtener un proceso eficiente, confiable y seguro.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el proceso de hidrogenación del aceite de palma africana, con la finalidad de incrementar la calidad del producto final y cumplir con las especificaciones establecidas.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Analizar el proceso de hidrogenación del aceite de palma con la finalidad de identificar los factores involucrados que afectan la calidad del producto final.
2. Determinar el porcentaje de isómeros cis y trans en las muestras de materia prima y bases hidrogenadas en cada uno de los reactores a fin de compararlo con las especificaciones establecidas por la norma Covenin.
3. Comparar el funcionamiento y operatividad de los reactores Buss y D'Smet a fin de evaluarlos e identificar si existen fallas que afecten la calidad del producto final.
4. Proponer mejoras y acciones correctivas en el proceso de hidrogenación con el fin de garantizar la calidad del producto final.
5. Seleccionar las alternativas más adecuadas teniendo en cuenta la evaluación técnica de cada una con la finalidad de garantizar una mejora en el proceso.
6. Realizar una evaluación económica de las alternativas seleccionadas a fin de establecer una factibilidad de implementación.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación presenta relevancia social ya que la formación de trans isómeros se da principalmente durante la hidrogenación de aceites altamente insaturados, se ha determinado que la presencia de estos aceites afecta los niveles de colesterol originando enfermedad coronaria y

enfermedades cardiovasculares, se necesita ofrecer un producto de calidad teniendo el cliente la satisfacción que desea. (Griguol, V; 2005).

Asimismo es necesario resaltar que la empresa necesita estar al nivel competitivo y para esto debe renovarse para seguir ofreciendo un producto que satisfaga al cliente, además de que permitirá que el proceso se lleve a cabo garantizando mejoras en la operatividad, productividad y rendimiento del proceso. Tiene implicaciones prácticas ya que se desea obtener información a nivel experimental de los problemas que existen en cada una de las fases del proceso que va orientada a la mejora, para luego plantear las alternativas correctivas, lo cual vendría siendo el valor teórico que presenta esta investigación, así como también el aportar conocimientos para otras investigaciones futuras.

De igual manera esta investigación presenta un aporte metodológico ya que se establecerá una estrategia para la recolección de datos necesarios para plantear mejoras que permitan ofrecer una calidad en el producto.

Adicionalmente presenta aportes significativos a la ciencia y tecnología en el área de las grasas y aceites, dando un enfoque más actualizado.

A nivel de la Universidad de Carabobo desarrollar este trabajo permitirá aportar soluciones en la industria de alimentos a nivel ingenieril, aplicando los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería Química, en la gestión de calidad. Además que podrá servir de fuente de información para próximas investigaciones.

A nivel personal ayudará en la formación profesional para adquirir conocimientos en el área de la industria de alimentos, además permitirá optar por el título de Ingeniero Químico.

1.5. LIMITACIONES

En la presente investigación se pudieran considerar algunas limitantes entre las cuales está la falta de producción generada por las paradas de planta, la cual limita el desarrollo de la presente

investigación, así como la poca disponibilidad de equipos y análisis requeridos para el progreso de la misma.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la investigación y se realiza un análisis detallado de los mismos, comparando con las especificaciones de calidad establecidas por la empresa.

4.1- Caracterización de la materia prima

En la tabla 4.1 se presenta las propiedades fisicoquímicas del aceite de palma cruda y desodorizada. Estas se realizaron tomando en cuenta las normas establecidas por el laboratorio y bajo las normas Covenin.

Tabla 4.1. Caracterización del aceite de palma crudo (materia prima) y desodorizado

Muestra estudiada		Aceite Crudo		Aceite Desodorizado	
Identificación		PAC-013	PAC-014	PAD-025	PAD-026
Índice De Refracción ($N_d \pm 0,00038$) (60°C)		1,45150	1,45150	1,45150	1,45150
Acidez (% $\pm 0,05$)		5,35	6,22	0,09	0,10
Índice de Yodo ($I \pm 0,1$) (Cgl/g)		50,3	49,0	50,3	49,0
Color (Lovibond)	Rojo (adim)	79	40	6,9	6,2
	Amarillo (adim)	26	26	69	62
	Azul (adim)	0	0	0,6	0,4
Índice de fósforo ($I \pm 0,1$) (ppm)		13,0	12,0	1,0	1,2
Humedad (% $\pm 0,02$)		0,40	0,20	0,00	0,02

Para la palma cruda y desodorizada se analizaron 2 lotes, a los cuales se les realizaron las pruebas fisicoquímicas respectivas con la finalidad de verificar que la materia prima y la procesada en la planta cumple con los valores estándares de calidad exigidos, estos se muestran en la tabla 4.2, donde los valores promedios de la materia prima analizada cumple con los

estándares de calidad de la industria en estudio, representada como valores de identidad; esta también se comparó con los parámetros del CODEX el cual permite valores mas elevados. Cabe destacar que la acidez se encuentra fuera de la especificación de acuerdo a las normas de la industria, pero esto no influye de manera significativa, ya que es posible reducirla a lo largo del proceso.

Tabla 4.2. Especificaciones fisicoquímicas del aceite de palma crudo

Tipo de análisis	Valores promedios	Valores de identidad	Parámetros según Codex alimentarius
Índice de refracción ($N_d \pm 0,00038$) (60°C)	1,45150	1,44450-1,45250	--
Acidez ($\% \pm 0,05$)	5,35-6,22	5 máx.	10 máx.
Índice de Yodo ($I \pm 0,1$) (Cgl/g)	49,0-50,3	50,55	50-55
Fósforo ($I \pm 0,1$) (ppm)	12,0-13,0	16 máx.	--
Humedad ($\% \pm 0,02$)	0,23-0,40	0,50 máx.	--
Color (1'' a/r/az)	Rojo	Rojo	--

4.1.1- Análisis de las variables involucradas en el proceso

Para el análisis del proceso de hidrogenación se realizó el diagrama causa efecto, el cual se muestra en la figura 4.1, mediante este se determinó cuales eran las variables más influyentes en cada una de las etapas. Por otra parte, a través del diagrama de Pareto mostrado en la figura 4.2, se representan de forma resumida las fallas más relevantes, al igual que la frecuencia con la que ocurren en este. Siendo una guía a la hora de proponer alternativas para la mejora del proceso.



Resultados y Discusiones

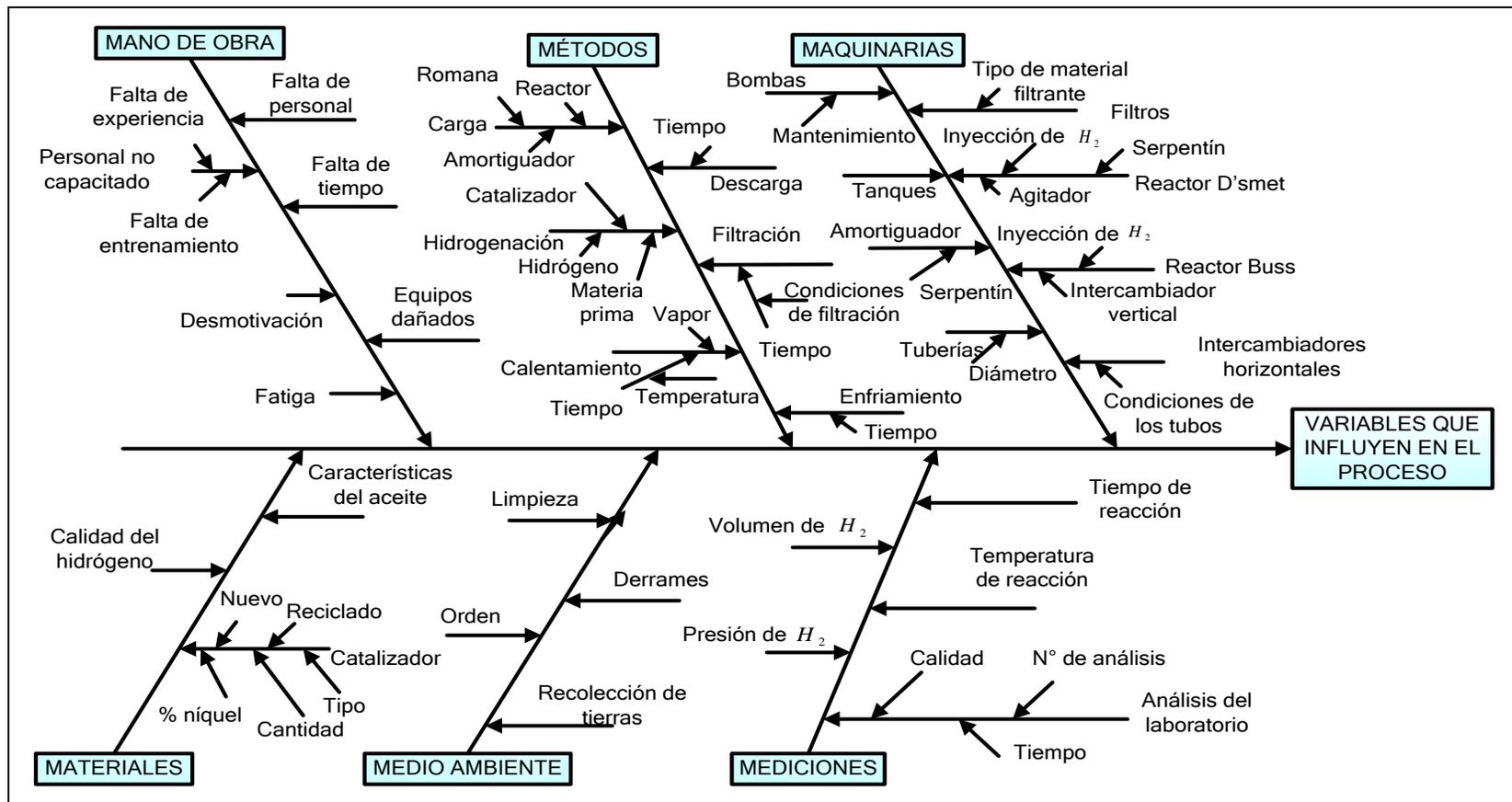


Figura 4.1. Diagrama Causa-Efecto

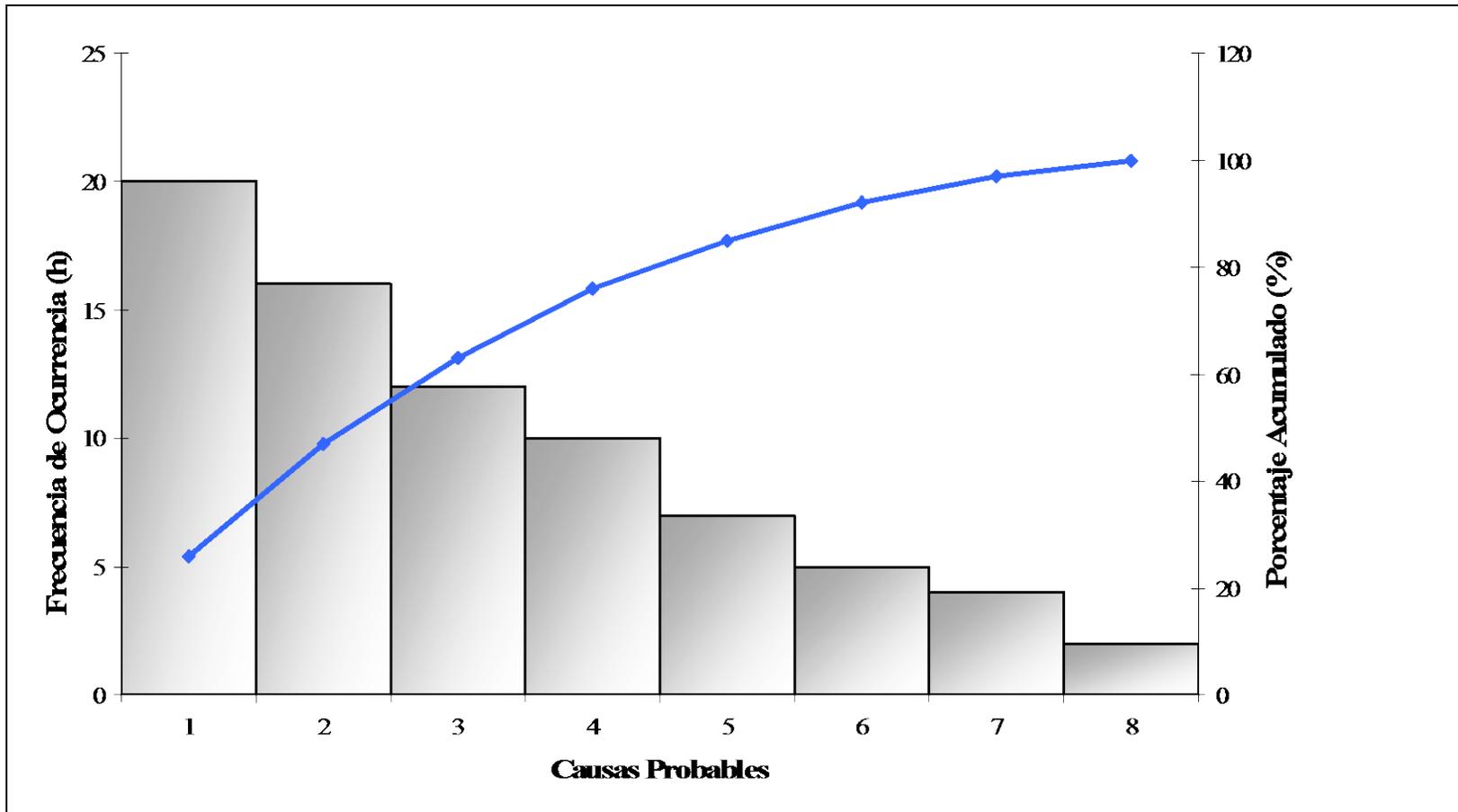


Figura 4.2. Fallas frecuentes ocurridas en el proceso de hidrogenación.

Las fallas más relevantes representadas en el diagrama de Pareto, son el calentamiento inadecuado, la baja presión de hidrógeno y los filtros obstruidos, ya que generan más pérdidas de tiempo ocasionando retrasos en el proceso, no cumpliendo así con el plan de producción. Por esta razón se toma en cuenta esto al plantear las alternativas de mejoras.

4.2- Determinación de isómeros cis y trans en la materia prima y bases hidrogenadas.

Tomando en cuenta el objetivo planteado, se determinaron los porcentajes de grasas cis y trans del aceite de palma cruda y desodorizada, además de las bases hidrogenadas generadas por cada equipo, esto se realizó a través de una cromatografía capilar según la norma A.O.C.S, en un equipo de cromatografía modelo Autosystem marca Perkin Elmer. En la tabla 4.3 se muestra los resultados obtenidos de cada una de las muestras analizadas, al igual que se exponen los cromatogramas obtenidos a partir de la figura 4.3.

En la tabla 4.3, se observa un alto porcentaje de isómeros cis, estas son las denominadas grasas buenas. En este grupo está la omega 6 (C 18:2 ácido linoleico) esta tiene la capacidad de disminuir fuertemente el colesterol malo, posee propiedades antiinflamatorias y tiende a disminuir el riesgo de enfermedad coronaria. Por lo tanto no representa ningún peligro para el ser humano ya que el organismo necesita ácidos grasos cis, en cambio los ácidos trans no existen en la naturaleza. (Uauy., 2007).

Los porcentajes de grasas trans del aceite de palma cruda resultan nulos, esto se debe a que el material no ha sido procesado, a diferencia del material desodorizado; el cual posee un porcentaje de 0,5% valor que se considera mínimo, debido a que este ha sido sometido a un proceso de desodorización, el cual se realiza a temperaturas elevadas por tiempos inferiores a una hora. Las bases hidrogenadas presentan porcentajes más elevados, ya que éstas son sometidas a sucesivas etapas de calentamiento previas a la hidrogenación, en donde además influyen diversos factores, como la presión de hidrógeno inadecuada y a las condiciones en las que el catalizador lleva a cabo la reacción, es por ello que se deben controlar dichos factores.

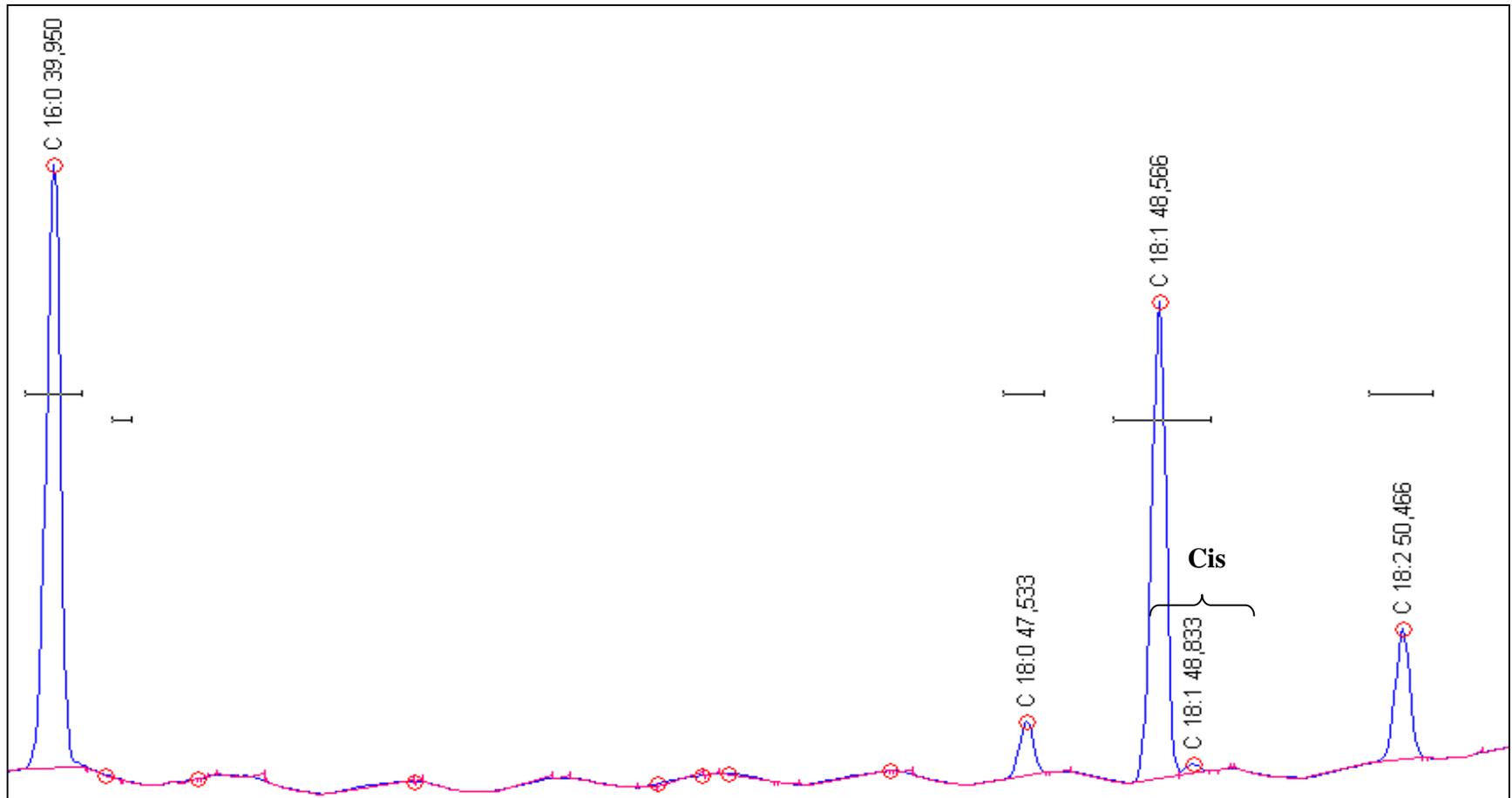


Figura 4.3: Cromatograma de la palma cruda

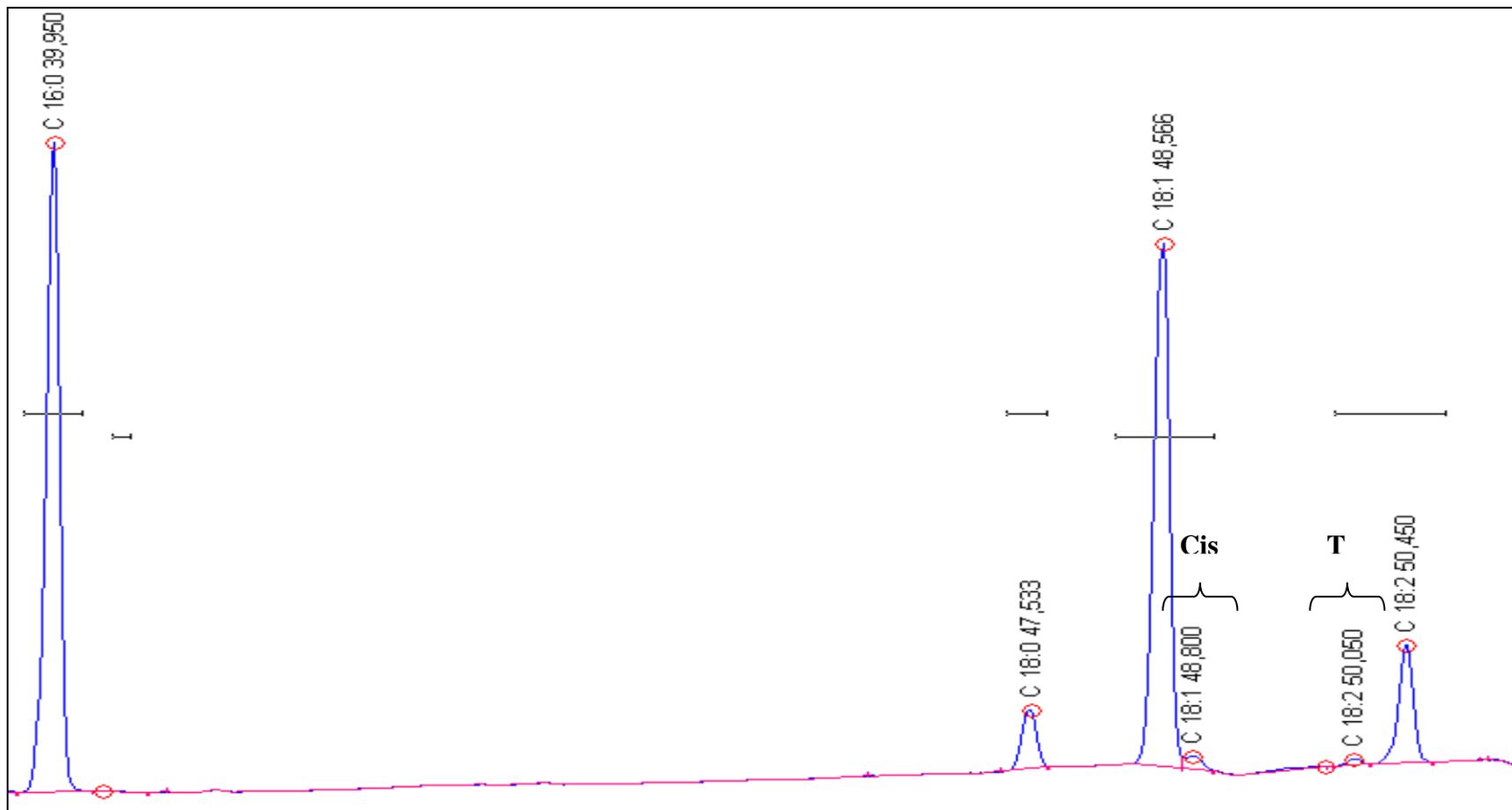


Figura 4.4: Cromatograma de la palma desodorizada

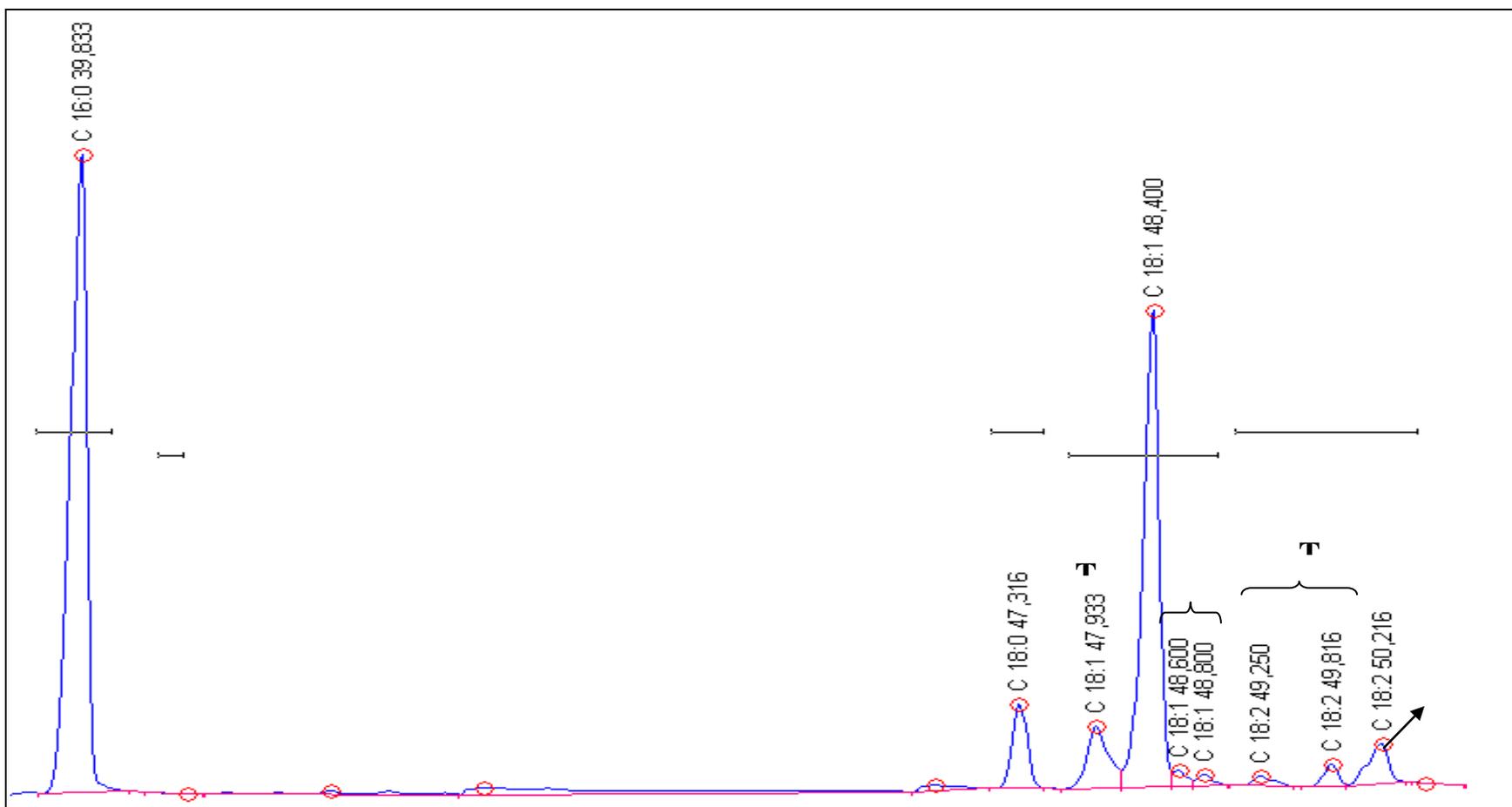


Figura 4.5: Cromatograma de la palma hidrogenada por el Buss (lote 1)

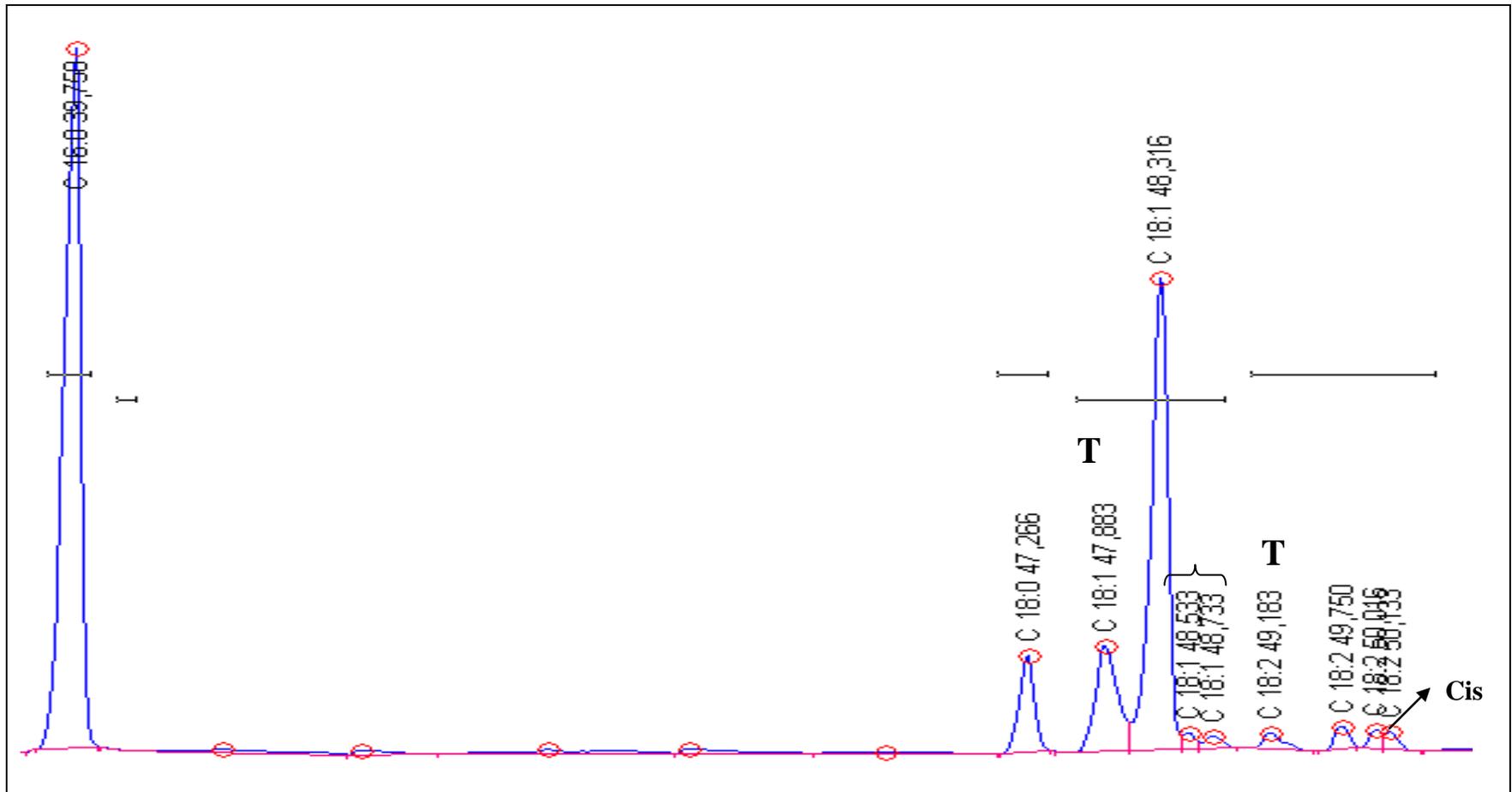


Figura 4.6: Cromatograma de la palma hidrogenada por el Buss (lote 2)

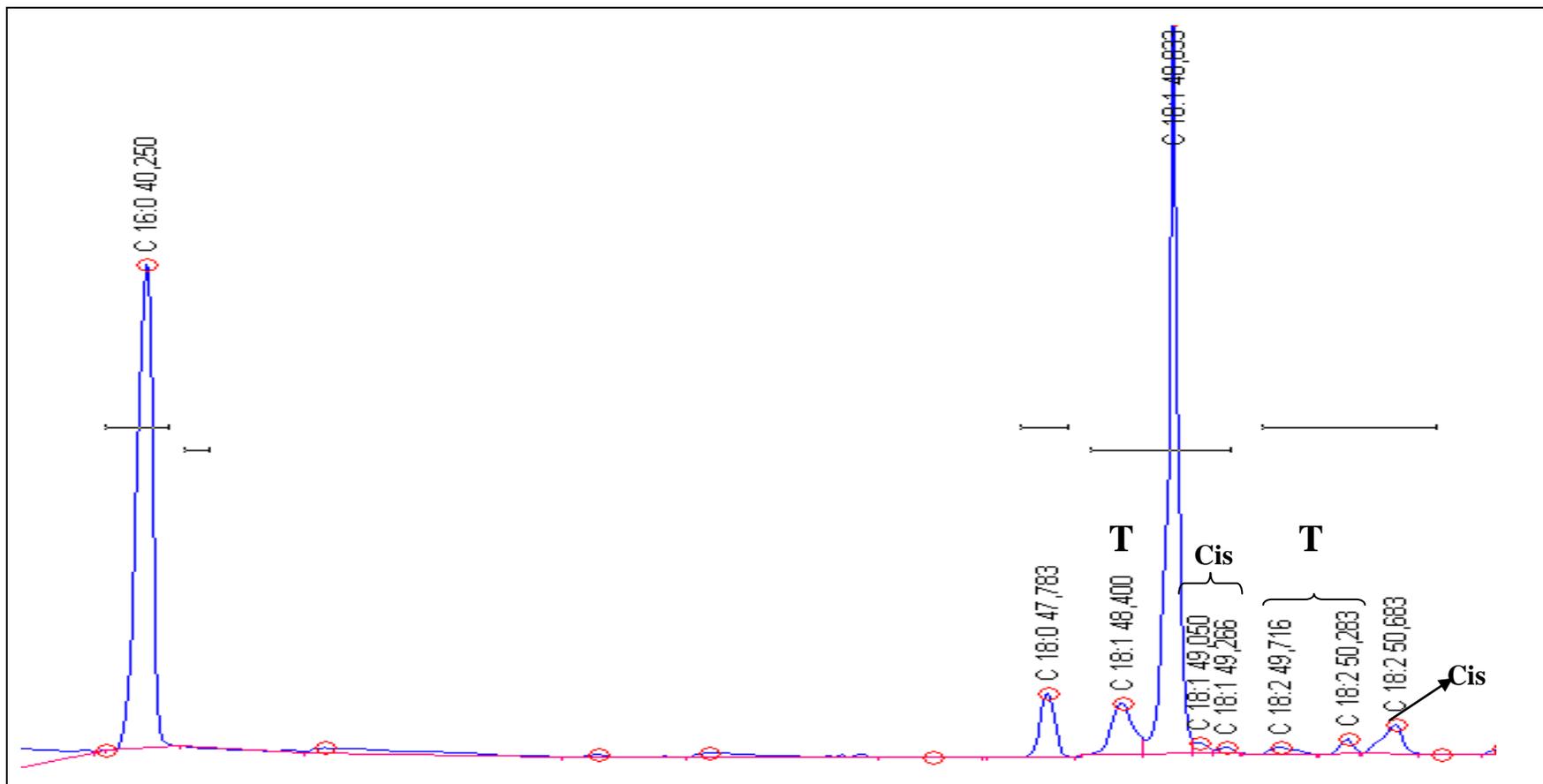


Figura 4.7: Cromatograma de la palma hidrogenada por el D'smet (lote 1)

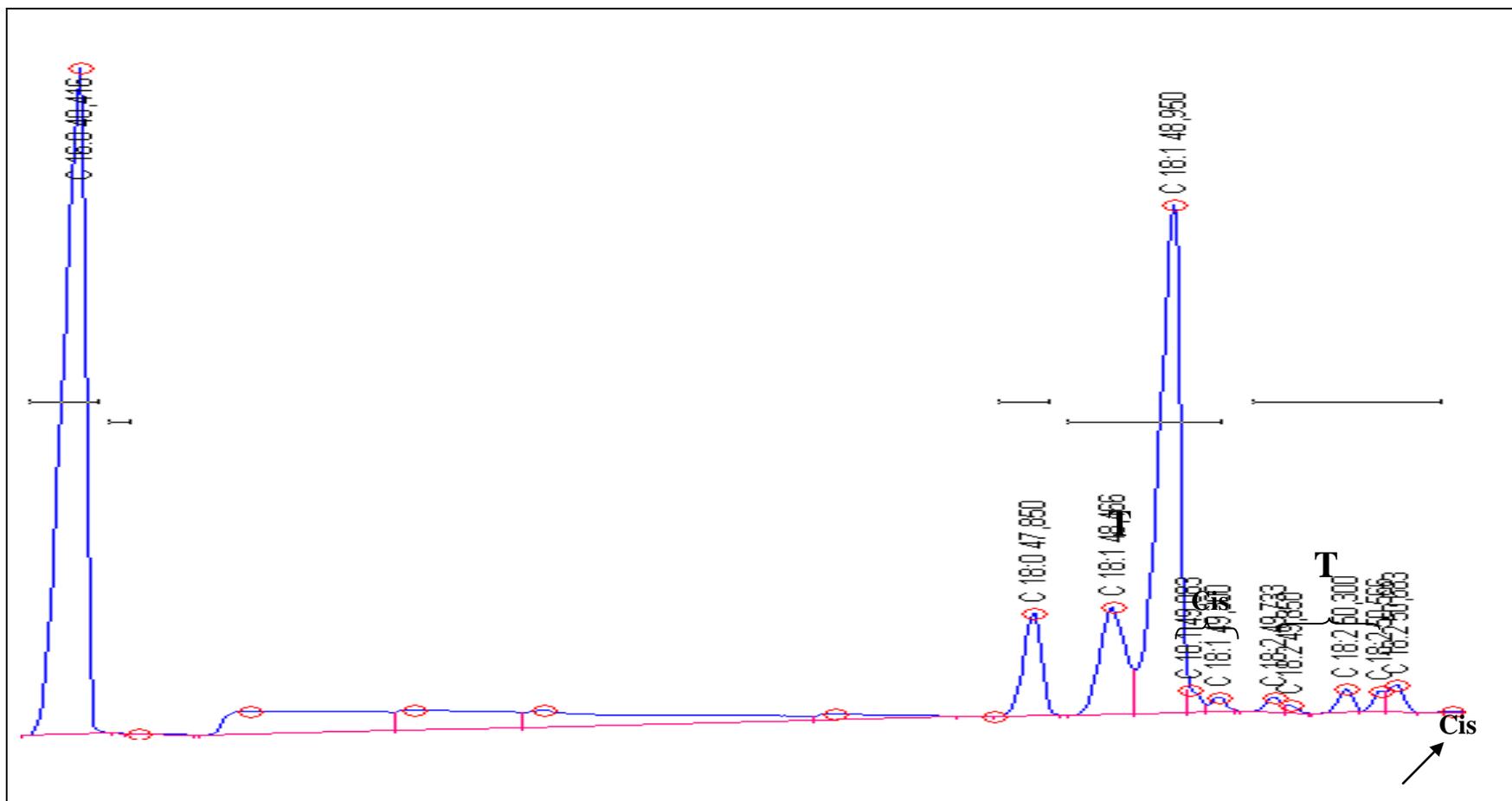


Figura 4.8: Cromatograma de la palma hidrogenada por el D'smet (lote 2)

Tabla 4.3. Porcentaje de isómeros cis y trans de la palma analizada

Material	Isómeros cis (% ± 0,3)	Isómeros trans (% ± 0,3)
Palma cruda	37,2	0,0
Palma desodorizada	47,3	0,5
Base hidrogenada del sistema Buss	35,4	6,3
	39,0	10,3
Base hidrogenada del sistema D'smet	35,8	7,9
	48,9	10,3

Para verificar que los porcentajes de grasas trans resultantes, se encuentren dentro de los estándares de calidad establecidos, se compararon con los porcentajes establecidos en España (Griguol et al., 2005), como se muestra en la tabla 4.4.

Como puede observarse en cada una de las muestras, los valores para la palma cruda y desodorizada están dentro de especificaciones, en cambio en las dos muestras hidrogenadas tanto por el Buss y el D'smet, se salen de las especificaciones para C 18:1 y C 18:2. Al comparar los valores resultantes de grasas trans para estas cadenas generados por el equipo Buss y D'smet, se observa que aunque ambos están fuera de especificaciones, el sistema D'smet produce mayor cantidad de grasas trans que el sistema Buss.

La formación de estas grasas trans se debe a diferentes aspectos, entre ellos esta el exceso de calentamiento antes de ser hidrogenado el material, otro aspecto influyente es la cantidad de catalizador que se utiliza y si este se encuentra envenenado, ya que esto prolonga el tiempo de reacción ocasionando así que aumente la formación de trans, así como también la presión a la que se suministra el hidrógeno. Si el material después de hidrogenar tiene un enfriamiento deficiente, también se producen isómeros trans, debido a que tarda en bajar la temperatura.

Una manera de reducir la formación de grasas trans, es controlando que la temperatura en el convertidor se mantenga dentro de un rango de operación aceptable entre 175 y 190 °C, otro factor importante que se debe vigilar es que la presión y la cantidad de hidrógeno que se alimenta al reactor sea la adecuada; ya que en caso contrario la reacción de hidrogenación se retrasa.

El impacto de las grasas trans en los productos finales como margarina suaves y mantecas industriales, se ve minimizado ya que las bases hidrogenadas obtenidas son mezcladas en diferentes proporciones con materiales sin hidrogenar, como estearina y palma desodorizada, con lo cual estos valores entran dentro de las regulaciones establecidas.

Tabla 4.4. Comparación de las grasas trans de las muestras con los estándares de calidad

Grupo	% Grasas trans estándares	% grasas trans de las muestras analizadas (% ± 0,3)					
		Cruda	Desodorizada	Hidrogenada Buss		Hidrogenada D'smet	
C 18:1 t	2,14-8,18	0,0	0,0	5,5	9,1	5,5	8,3
C 18:2 t	0,01-0,49	0,0	0,5	0,8	1,2	2,0	2,4
C 18:3 t	0,00-0,21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

4.3- Comparación de los sistemas de conversión Buss y D'smet de manera de identificar las fallas existentes en dichos sistemas.

4.3.1- Caracterización del producto hidrogenado

Es necesario analizar las cargas y bases obtenidas del proceso de hidrogenación, donde las bases están constituidas por la mezcla de 4 o 6 cargas, la cual es denominada base 42, para evaluar la calidad del material hidrogenado a través de pruebas fisicoquímicas a fin de comparar con las especificaciones establecidas por la empresa y determinar si se encuentran fuera o dentro de parámetros.

En la figura 4.9 se muestra el comportamiento de las cargas hidrogenadas para la obtención de una base 42 por el sistema Buss. Se analizaron 44 cargas para el sistema Buss, para la obtención de la figura, se graficó el número de cargas en función del punto de fusión. Se

encontró que un 45% de las cargas analizadas se encuentran alrededor del valor promedio, mientras que el 55% restante está mas alejado, con un 27,5% por encima y un 27,5% por debajo del punto de fusión promedio; esto se puede deber al comportamiento del sistema en lo que se refiere a la presión a la cual se suministra el hidrógeno al interior del equipo, a la forma del dispersión del gas a través del Venturi y que al contacto íntimo entre el aceite, el hidrógeno y el catalizador se logra a través de la recirculación continua. Algunas de estas cargas pueden ver afectado su punto de fusión final por el criterio particular de cada operador, en lo que respecta al tiempo necesario para llegar a un índice de refracción establecido.

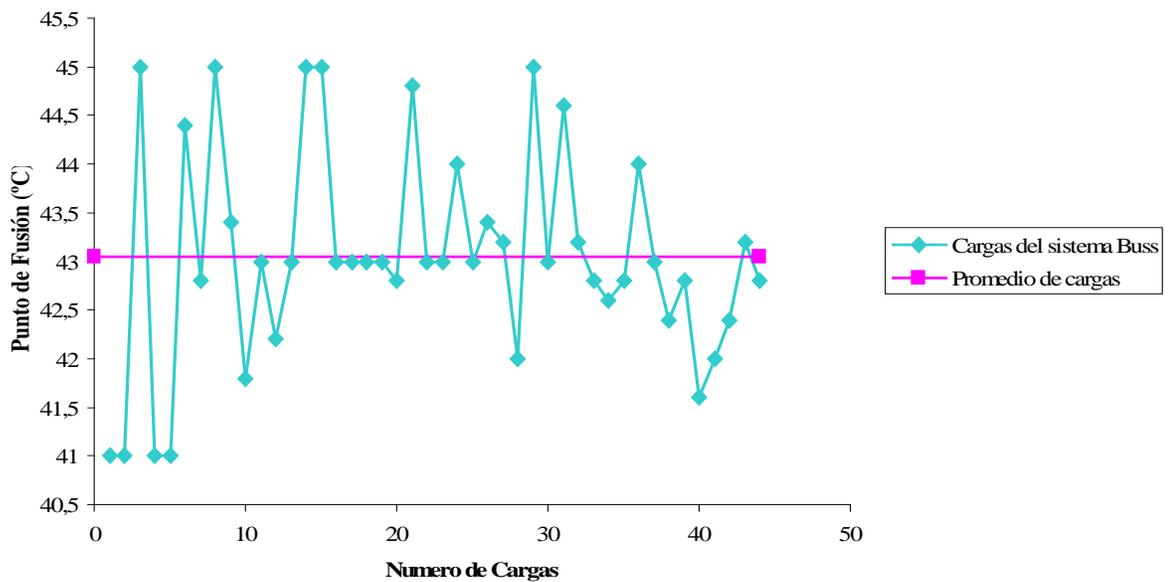


Figura 4.9. Cargas hidrogenadas del sistema Buss

La figura 4.10 muestra los resultados del punto de fusión de las cargas obtenidas por el sistema D'smet, en este sistema también se determinó el punto de fusión de las cargas hidrogenadas, dando como resultado que un 32% de estas se encuentran alrededor del valor promedio, el 68% restante está dividido en un 27% por debajo y un 41% por encima del punto de fusión promedio. Al igual que el sistema Buss estas divergencias se pueden deber a que la inyección de hidrógeno se realiza por la parte inferior del equipo, a través de un anillo perforado, el mezclado del hidrógeno con el aceite se realiza mediante un agitador de hélices o paletas a una

velocidad aproximada de 110 rpm, igualmente el índice de refracción final es un factor influyente; ya que este hará variar el tiempo que se disponga para hidrogenar y el punto de fusión que se requiera llegar.

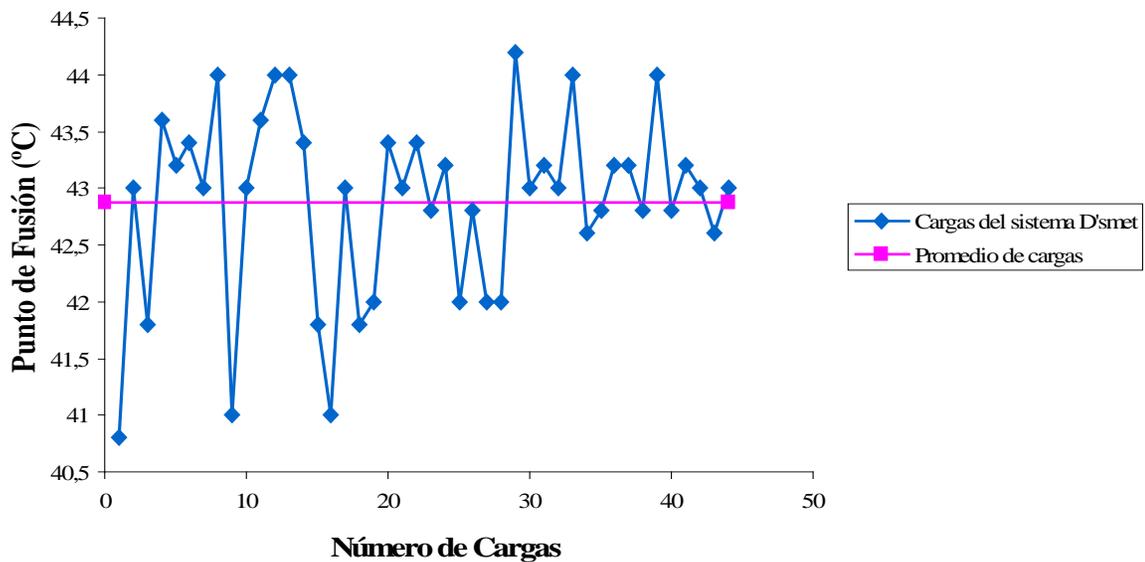


Figura 4.10. Cargas hidrogenadas del sistema D'smet

El comportamiento de las cargas hidrogenadas obtenidas tanto en el convertidor Buss como en el D'smet se muestra en la figura 4.11 logrando establecer una comparación entre ambos convertidores. En esta figura se muestran diferencias en las cargas hidrogenadas obtenidas por los sistemas Buss y D'smet, esto se debe al funcionamiento de ambos sistemas, entre ellos está la forma de agitación y la manera en que se suministra el hidrógeno.

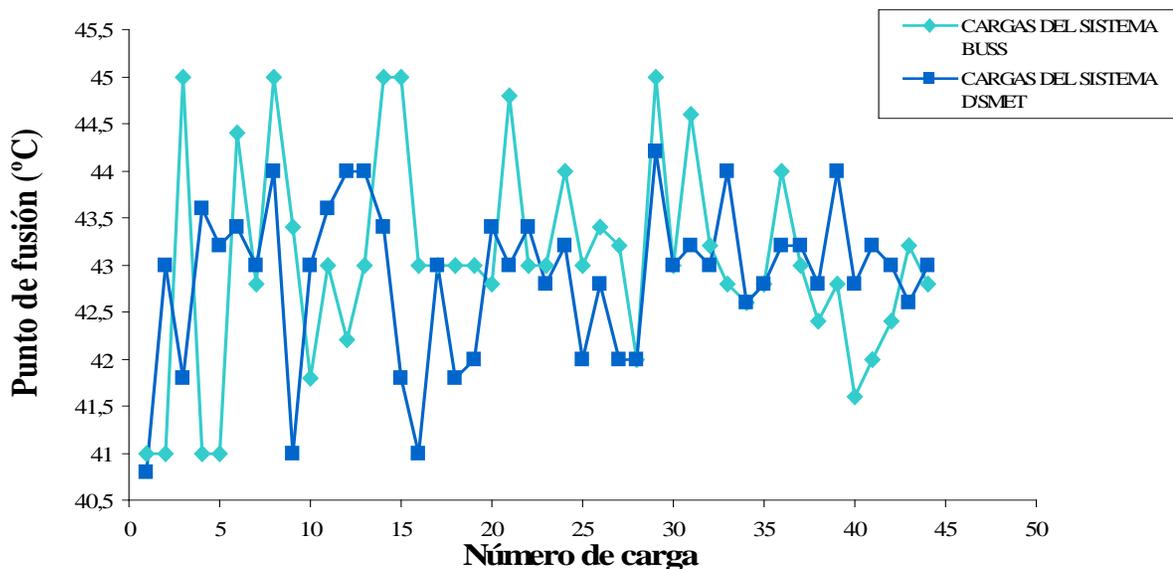


Figura 4.11. Cargas hidrogenadas de los sistema Buss y D'smet

4.3.2- Evaluación de las bases hidrogenadas de los sistema Buss y D'smet.

Estas se representan en la figura 4.12, donde se comparan las bases hidrogenadas en el sistema Buss con los límites de calidad fisicoquímicos establecidos por la empresa, para determinar si estas se encuentran dentro de especificaciones.

Se graficaron 11 bases, las cuales se obtuvieron de las 44 cargas analizadas, como se puede observar hay 4 bases que se encuentran fuera de los límites de especificación, indicando que el 36,4% de las muestras analizadas no están cumpliendo con los parámetros fisicoquímicos de calidad. Esto se debe a que las cargas utilizadas para la formación de base 42 presentan un punto de fusión elevado, lo que ocasiona una mayor cantidad de grasa sólida, por lo tanto al formar las bases el índice de grasa sólida resulta mayor al establecido.

Para reducir los índices de grasa sólida es necesario disminuir el punto de fusión de las cargas hidrogenadas, para esto se necesita conocer cuanta cantidad de hidrógeno se les debe

suministrar para obtener una base 42, ya que a medida que transcurre el tiempo y se introduce hidrógeno aumenta el punto de fusión.

Por otra parte uno de los factores que puede afectar estos resultados, es el hecho de que cuando se lleva la muestra para determinar el índice de refracción, algunas cargas continúan hidrogenándose, lo cual puede afectar el punto de fusión final.

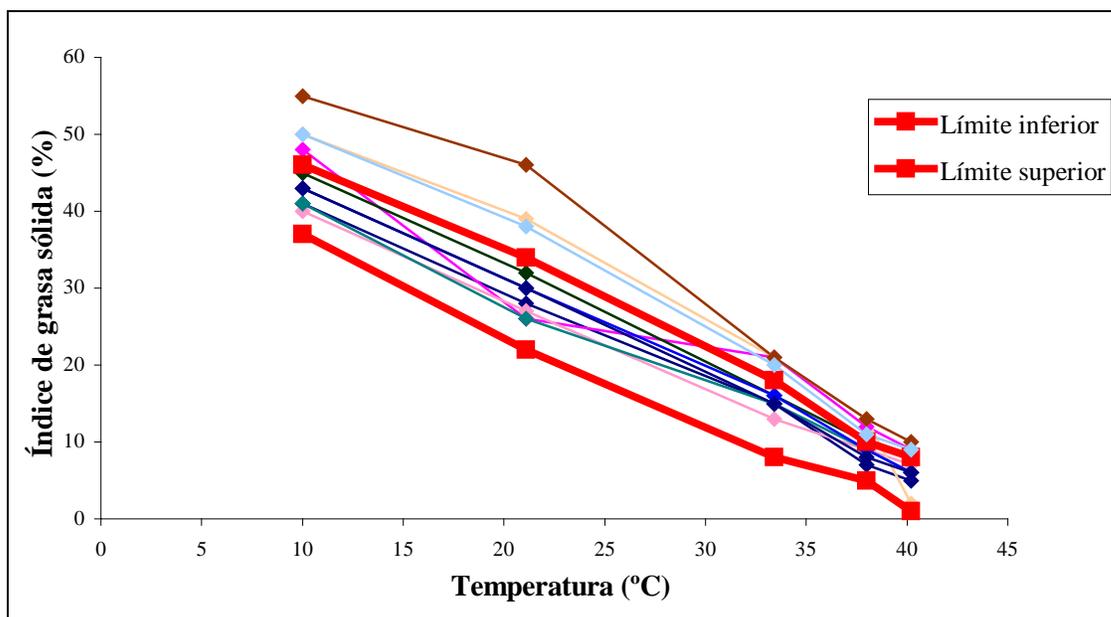


Figura 4.12. Bases hidrogenadas en el sistema Buss

A continuación en la figura 4.13 se muestra las bases hidrogenadas por el sistema D'smet, para determinar si están dentro de los límites de especificaciones de la empresa, y así poder comparar ambos sistemas.

Al igual que en el sistema Buss se graficaron 11 bases, de las cuales 1 se encuentra fuera de los límites de especificación, siendo este el 9% de las muestras analizadas. Asimismo, el hecho de que la base se encuentre fuera de especificación se debe a una mayor presencia de grasa sólida, debido a la cantidad de hidrógeno suministrado y el tiempo de hidrogenación. Comparando las bases de ambos sistemas, en el sistema D'smet se producen más bases hidrogenadas que están dentro de los parámetros con respecto al sistema Buss, debido al comportamiento de este. Por otra parte, la mano de obra es un factor influyente en la operación y

control de las variables, ya que ambos equipos están diseñados para generar cargas bajo especificaciones de calidad establecidas, en lo que respecta al índice de grasa sólida.

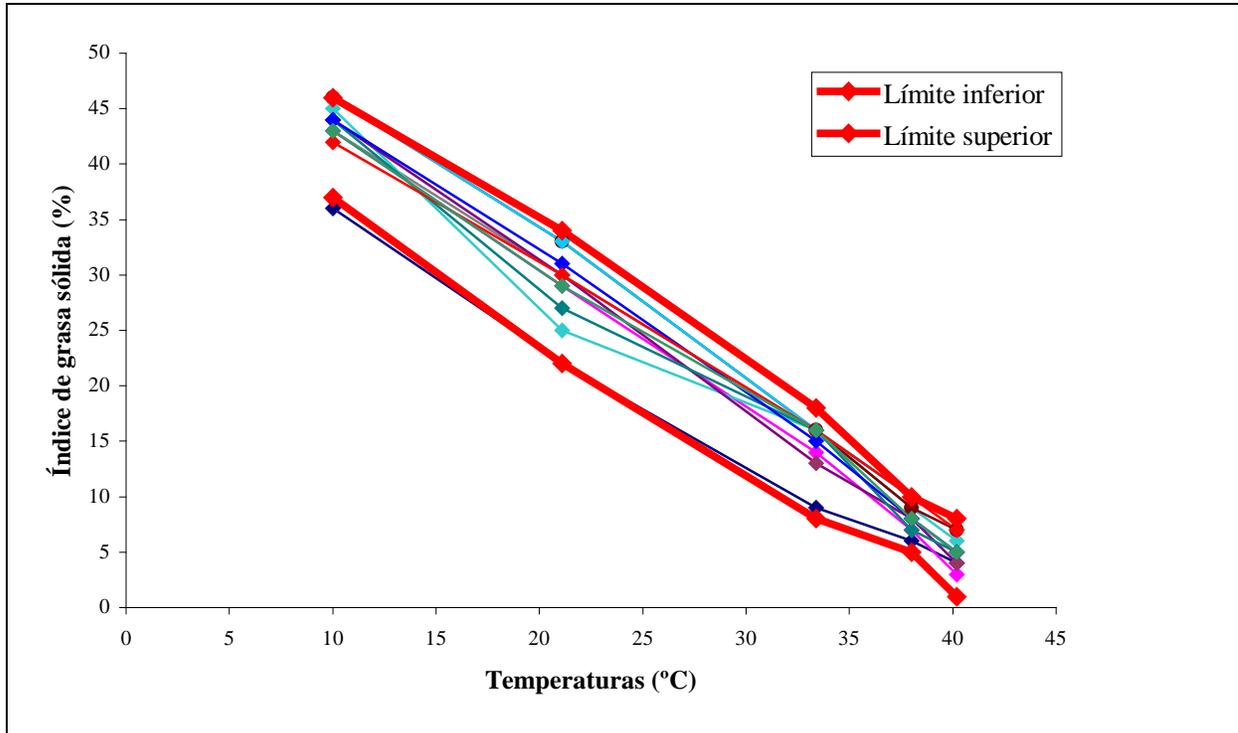


Figura 4.13. Bases hidrogenadas en el sistemas D'smet

4.3.3- Comparación de las etapas del proceso de hidrogenación de los sistemas de conversión.

❖ Sistema Buss

Para la evaluación del proceso de hidrogenación, se tomaron 20 cargas a las cuales se le determinaron los tiempos para cada una de las etapas. En la figura 4.14 se muestra la grafica de tiempos del sistema Buss.

En esta se observa el tiempo en el que se lleva a cabo cada una de las etapas, siendo la etapa de calentamiento la de mayor período, seguida de la filtración y la hidrogenación. En total una carga tarda en completar su proceso de hidrogenación en 392 minutos lo que equivale a 6

horas y 30 minutos. Si comparamos con el manual de hidrogenación de Industrias Diana, esta etapa debería tener un periodo de tiempo de 40 a 46 minutos, mientras que en el Buss presenta un periodo de 79 minutos, lo que ocasiona retrasos en el proceso, al igual que la reserva, la cual representa el tiempo que tardan en obtener los análisis del laboratorio para determinar si cumple con las especificaciones. Si tomamos en cuenta esas 6 horas y 30 minutos que se toma una carga, se estima que en 24 horas es posible obtener solo 3 cargas y una estaría en procesamiento. Si bien es cierto que a medida que avanza la carga en el proceso, se adelanta con la siguiente de manera de ahorrar el mayor tiempo posible, se puede lograr un avance mas rápido, maximizando el uso del reactor de hidrogenación Buss, minimizando su uso como un sistema de calentamiento y refrigeración.

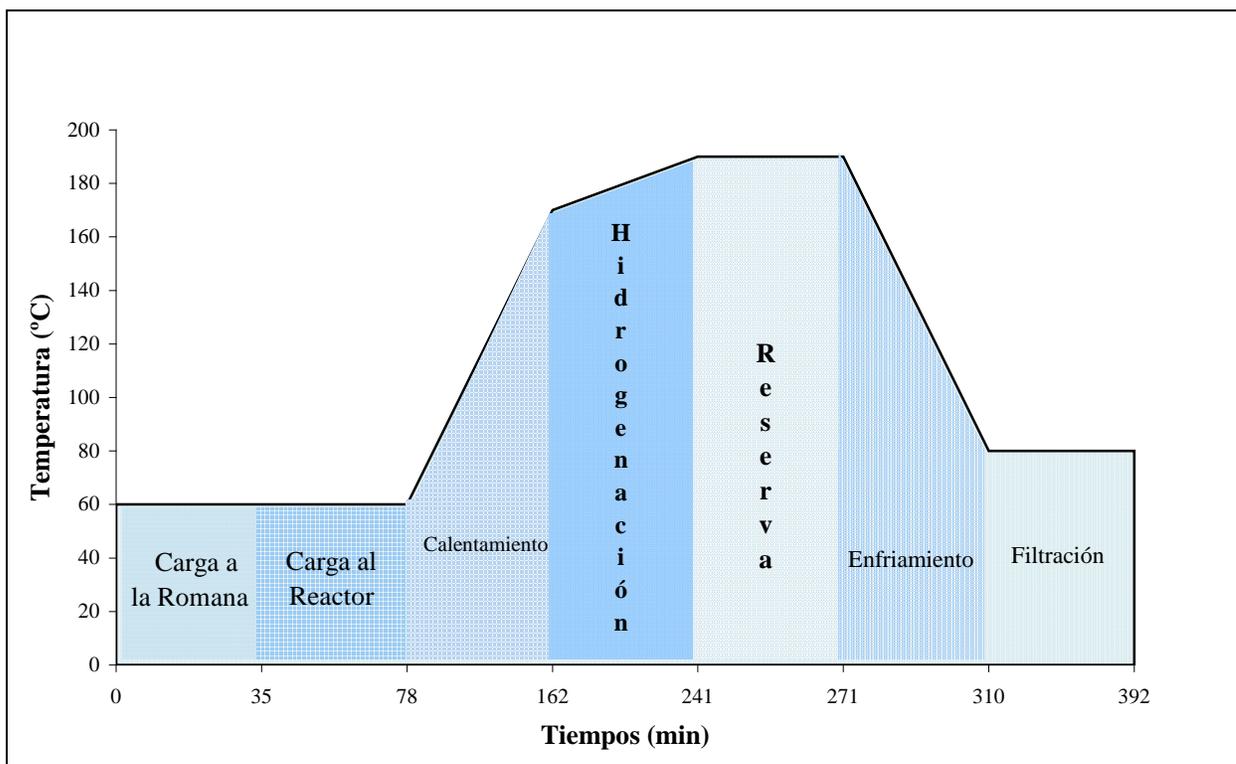


Figura 4.14. Tiempos de las etapas involucradas en el proceso de hidrogenación del sistema Buss.

❖ Sistema D'smet

En la figura 4.15 que se observa a continuación, se representa la duración y la temperatura alcanzada en cada una de las etapas del proceso de hidrogenación del mismo, este posee dos etapas mas que el sistema Buss, estas son la carga al tanque amortiguador y la descarga al tanque de caída, esto causa que el proceso se lleve a cabo con mayor duración. En promedio la carga al tanque amortiguador tuvo una duración de 37 minutos y la descarga al tanque de caída 19 minutos. En total una carga completa su proceso de hidrogenación en 411 minutos, lo que equivale a 6 horas y 51 minutos. Apreciando las 6 horas y 50 minutos que se toma una carga, en 24 horas es posible obtener solo 3 cargas y una estaría en procesamiento al igual que en el Buss.

Las etapas que generan mayor periodo al igual que en el sistema Buss, fueron el calentamiento, la hidrogenación y la filtración teniendo una duración de 105, 61 y 58 minutos respectivamente. El calentamiento es una etapa fundamental y de gran importancia, y se pudo apreciar que se da de manera diferente en el sistemas D'smet que en el Buss; ya que en este último, el calentamiento se produce por recirculación del aceite en el intercambiador de calor, mientras que en el sistema D'smet, el calentamiento se genera a través de un serpentín interno que calienta el fluido que se encuentra en agitación dentro del convertidor. La hidrogenación es una fase del proceso que se da de forma distinta en los sistemas Buss y D'smet, como se puede apreciar en la figura 4.15, esta etapa se realiza de manera mas lenta en el Buss; esto se puede deber a que la inyección de hidrógeno se realiza de manera distinta en ambos sistemas.

Una vez determinados los tiempos en los que se llevaron a cabo las etapas del proceso, se puede concluir que el sistema Buss es mejor y mas eficaz que el sistema D'smet, debido a que el tiempo de procesamiento es mas corto, y a nivel industrial lo que se requiere es obtener la mayor cantidad de cargas en un día por lo que se requiere disminuir los tiempos de procesamiento.

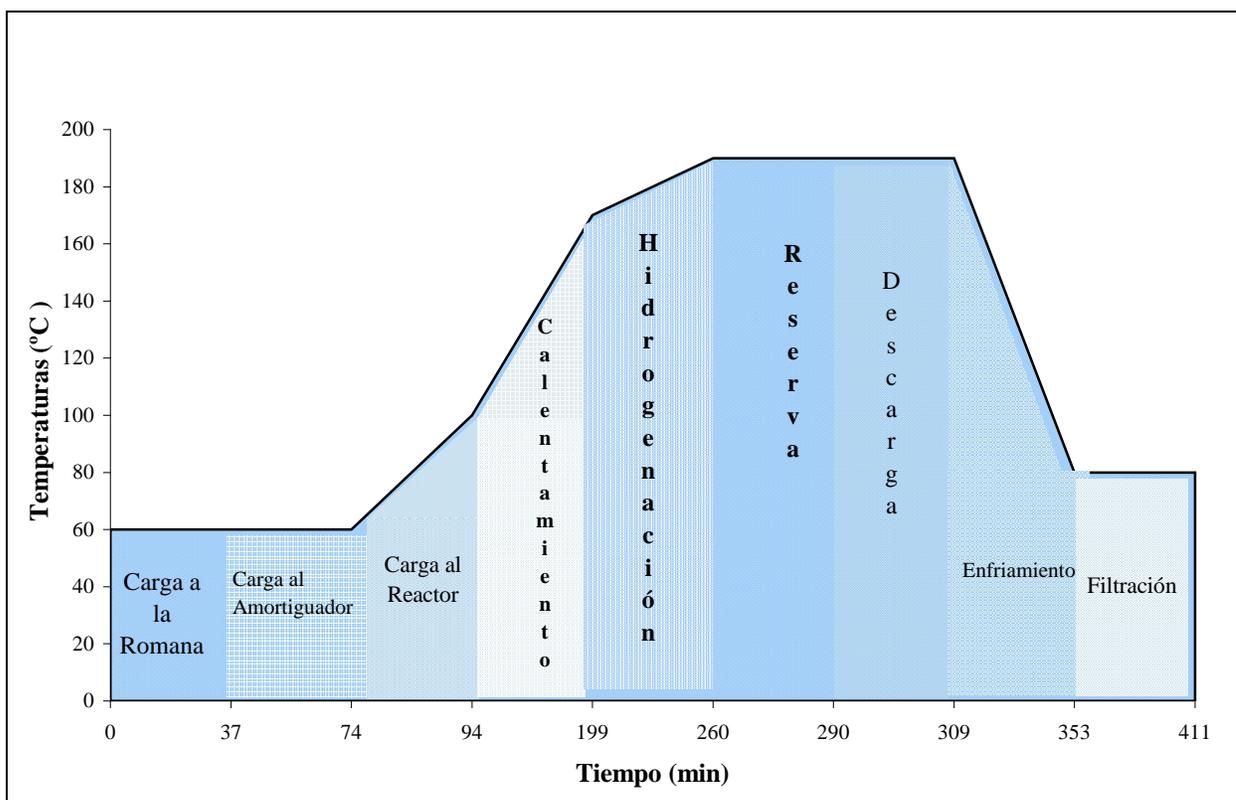


Figura 4.15. Tiempos de las etapas involucradas en el proceso de hidrogenación del sistema D'smet.

4.3.4- Filtros Catalíticos

La etapa de filtración catalítica se realiza tanto para el sistema Buss como para el D'smet, en la tabla 4.5 se aprecia el flujo másico obtenido en la filtración.

Como se puede observar, el flujo másico obtenido por el filtro del sistema D'smet es 7,81 Ton/h lo que indica, que las 7,5 Ton que representa una carga se filtran en menos de una hora, a diferencia del filtro del sistema Buss; el cual no le es posible filtrar una carga en ese mismo tiempo, esto se puede deber a que se opera a una presión de operación que no es la adecuada o sobrepasan el valor máximo de (45 libras), generando así fugas en el filtro. Otro factor influyente es la falta de mantenimiento de los filtros, en lo que respecta a la sustitución de las lonas por obstrucción y la ejecución incorrecta del procedimiento precapa, lo que produce un menor flujo, ocasionando retrasos en la filtración.

Por otra parte, como se puede observar en la tabla 4.5, los filtros difieren en el número de placas y el área de filtración, siendo el del sistema D'smet el que posee un área mayor, causando que su tiempo de filtración sea mas rápido que en el filtro del Buss.

Tabla 4.5 Flujo másico de aceite obtenido en los filtros catalíticos

Sistema	Nº de placas	Área (m ²)	Tiempo (t ± 0,01) h	Masa de aceite (m _a ± 0,01) Ton	Flujo másico de aceite (m ± 0,01) Ton/h
Filtro D'smet	35	12,95	0,96	7,5	7,81
Filtro Buss	18	11,52	1,36	7,5	5,51

4.4- Alternativas propuestas técnicamente

A continuación se describe de forma detallada los aspectos más relevantes de las alternativas de solución propuestas, así como los equipos principales que las integran.

- ❖ Mejoramiento del intercambiador de calor utilizado en el sistema de enfriamiento de las cargas hidrogenadas:

Esta alternativa se centra en mejorar el intercambiador de calor del sistema de enfriamiento de los convertidores que actualmente está en funcionamiento, para lograr una disminución considerable de la temperatura del agua de enfriamiento de los convertidores, se realizaron varias recomendaciones para lograr el mejoramiento. Una vez evaluado el equipo, se pudo determinar que no está operando correctamente, debido a que presenta diversas dificultades como tubos y coraza con alto nivel de incrustaciones y corrosión por falta de mantenimiento, 10 tubos condenados, el tamaño nominal de los tubos es de una pulgada y media, considerándose grande, debido a que el caudal entrante es de 330 gpm y esto ocasiona menor transferencia de calor, por lo que se recomienda aumentar la cantidad de tubos actuales y remplazar el tamaño nominal a 1 pulgada.

Además de lo antes mencionado es importante destacar que el agua de enfriamiento que se está empleando para disminuir la temperatura del agua de proceso, tiene una temperatura de 65°C, lo que causa que el enfriamiento de las cargas no sea el mejor. Por tal motivo también se plantea que el agua de enfriamiento se suministre desde la torre Marley, la cual puede absorber mayor carga térmica debido a que está sobrediseñada en un 50% para las operaciones de la planta, además no generaría daños internos al intercambiador de calor debido a que opera con agua suavizada en un rango de temperatura de 30 a 32°C, adicionalmente el flujo de agua que puede suministra es de 1250gpm, mucho mayor al flujo actual que es de 264 gpm.

❖ Diseño de un sistema de control automático en el enfriamiento de la reacción :

Esta alternativa consiste en diseñar un sistema para controlar la temperatura de la reacción de hidrogenación, con la finalidad de que ésta no exceda una temperatura de 190°C. La implementación de este sistema de control, permite que la reacción se mantenga en un rango de temperatura entre 160 y 190°C, mediante el agua proveniente de la torre de enfriamiento, ya que si el rango de temperatura es superado, se favorece la formación de isómeros trans en el sistema, ocasionando que disminuya la calidad de los parámetros fisicoquímicos del aceite hidrogenado. De esta manera se evita la operación manual del sistema de enfriamiento.

❖ Implementación de un equipo cuantificador de hidrógeno:

Esta alternativa consiste en implementar un equipo cuantificador de hidrógeno en la entrada de los convertidores, de manera de conocer el flujo que se suministra y la cantidad de hidrógeno necesario en la hidrogenación de cada carga, para controlar que no exista una sobre alimentación de hidrógeno, la cual causa retrasos en el proceso y favorece la formación de isómeros trans.

En la tabla 4.6 se muestran los resultados obtenidos al evaluar cada criterio de las alternativas propuestas. Estas alternativas se evaluaron en una escala del uno al cinco, siendo el uno el menos favorable y el cinco la más favorable, en el caso de los criterios se estableció la ponderación mayor a los que se consideran más influyentes a la hora de implementar una de las

alternativas, dando como resultado más factible el diseño de un sistema de control automático en el enfriamiento de la reacción. Sin embargo se seleccionaron las dos alternativas de mayor puntaje debido a que ambas disminuyen la generación de los isómeros trans, ayudando a mejorar las propiedades fisicoquímicas del producto final. Adicionalmente al sistema de control favorece la reducción de los tiempos de procesamiento, generando más producción.

Tabla 4.6. Matriz de selección de las alternativas propuestas

Criterios		Cuantificador de Hidrógeno (A)		Intercambiador de calor (B)		Sistema de Control de temperatura (C)	
Costos	40	3	120	1	40	4	160
Viabilidad técnica	10	5	50	3	30	4	40
Valor agregado	15	4	60	4	60	5	75
Disponibilidad	10	5	50	4	40	5	50
Mantenimiento	25	5	125	3	75	4	100
Resultados	100		405		245		425

4.5- Descripción de las alternativas seleccionadas

Alternativa A: Implementación de un cuantificador de hidrógeno

En la figura 4.16 se muestra un medidor de flujo MCCROMETER modelo V CONE VH01-A15N3 I 3095MV, por presión diferencial, cuerpo en acero inoxidable, para ser instalado entre bridas, exactitud de 1% a 2%. Conexiones al transmisor de presión diferencial y diámetro 1". Incluye el transmisor de presión diferencial, multivariable, calcula e indica el flujo másico, el diferencial de presión, la presión de línea. El flujo másico esta compensado por presión y temperatura.



Figura 4.16. Medidor de caudal de hidrógeno

El V Cone tipo wafer cuantifica el volumen o caudal (volumen/tiempo) de gas, el caudal es calculado por la parte electrónica del medidor, en este caso es un transmisor de presión diferencial, el cual puede calcular el caudal e indicarlo en pantalla a la presión y temperatura actual de la tubería.

El transmisor también puede compensar por presión y temperatura, llevando el valor del volumen a condiciones estándares únicos, para poder comparar siempre en unidades de masa, que son independientes de la presión y temperatura. El usuario siempre podrá leer el valor del caudal en el sitio, también la señal puede ser llevada a la sala de control. El V Cone se instala, entre las bridas de la tubería que están soldadas.

Alternativa C: Diseño de un control automatizado de temperatura en el sistema de calentamiento /enfriamiento de los convertidores Buss y D'smet.

El sistema de control automatizado diseñado para los equipos de conversión Buss y D'smet, como alternativa para el mejoramiento del proceso, se muestran a continuación en la figura 4.17 y 4.18, donde se incluyen los principales componentes involucrados en la propuesta, así como los diversos dispositivos y lazos de control empleados.

La automatización se realiza para el sistema de calentamiento antes de la hidrogenación, con la finalidad de que el aceite alcance y mantenga la temperatura adecuada para empezar dicho proceso. Una vez que comienza la hidrogenación la temperatura aumenta debido a que la reacción es exotérmica, lo que ocasiona que el aceite alcance temperaturas muy elevadas

produciendo esto grasas trans, por tal motivo se requiere implementar un control automatizado en el sistema Buss, el cual consta de un transmisor- indicador de temperatura en el reactor, la señal sensada por la termocupla es enviada a través del transmisor a los controladores, este último acciona la válvula de agua de enfriamiento para mantener la reacción en un rango de temperatura de (175-190)°C. Adicionalmente se pretende implementar un sistema de control automatizado para el enfriamiento de la carga hidrogenada, de manera que se disminuya la temperatura hasta 80 °C y no a temperaturas menores, ya que esto generaría un aumento de la viscosidad del material, causando retrasos en la filtración.

Al igual que el sistema Buss, en el D'smet, se requiere implementar lazos de control automáticos similares para el calentamiento del aceite, el control de temperatura en la hidrogenación y el enfriamiento del material. Una de las diferencias radica en que el serpentín del D'smet actualmente solo se utiliza para calentar el aceite, aunque también puede ser usado para enfriar, por tal motivo es necesario que se activen las líneas de enfriamiento para controlar adecuadamente la reacción. Otra diferencia es la etapa de enfriamiento, que aunque poseen el mismo sistema de control, se realiza en el tanque de caída y no en el convertidor.

4.6- Evaluación Económica de las alternativas seleccionadas

Para tomar una decisión acertada de la implementación de las alternativas seleccionadas, es importante realizar una evaluación de factibilidad económica de la puesta en marcha del proyecto, por ello se deben establecer los costos asociados a los equipos, accesorios y mano de obra calificada necesaria, así como la inversión a realizar y las ganancias que generará la implementación de las alternativas.

A continuación para la implementación de la alternativa C, se muestran los resultados obtenidos al realizar la factibilidad económica, calculados en el apéndice B.

Tabla 4.7. Ingreso bruto

Cantidad de producto	9.000
Precio por unidad	5.800
Total de ventas (BsF/Ton)	52.200.000

Tabla 4.8. Capital fijo

Costo de equipos (BsF)	39.384,13
Costo de instrumentación y control (BsF)	5.119,93
Costo de equipos eléctricos (BsF)	5.119,93
Costo de supervisión y entrenamiento (BsF)	1.969,20
Costo de arranque y pruebas (BsF)	976,72
Total capital fijo (BsF)	13.185,78

Tabla 4.9. Capital de trabajo e inversión

Capital de trabajo	(BsF)
Costo de inventario de repuesto	3.384,41
Efectivo en caja	1.575,00
Total de capital fijo	1.578.938,41
Inversión inicial	1.592.124,19

Tabla 4.10. Costos de producción e Impuesto sobre la renta

Costos de producción	(BsF)
Costo de manufactura	527,43
Impuesto sobre la renta	385.322,19

Tabla 4.11. Indicadores económicos de la alternativa

Valor actual (Va)	50.222.026,19 BsF
Tasa interna de retorno (TIR)	31,54%

Al analizar los indicadores económicos obtenidos, se observa que la alternativa C resulta productiva, debido a que los valores arrojan resultados mayores a cero como lo refleja la teoría. En cuanto a la alternativa A no se realizó el estudio de factibilidad económica, debido a que esta representa más que un aporte económico, uno a nivel social, ya que al implementar esta alternativa se podría disminuir el porcentaje de trans que se forman en el proceso de transformación química, tomando en cuenta de esta manera la salud del consumidor. Además es contribuyente a nivel ambiental, debido a que se disminuye el consumo de agua utilizado para la obtención del hidrogeno, ya que el proceso empleado para ello es la electrólisis, asimismo se reduce el consumo energético empleado en este, ayudando al medio ambiente en lo que respecta al calentamiento global.

Alternativas	Cotización	Costo total (Bsf)
Cuantificador de hidrógeno	Matco Technology C.A.	57.785,00
Automatización	Import Import C.A y Dpto de compras de Industrias Diana C.A	39.384,13

Beneficios económicos de la inversión:

Implementación de la alternativa A se tienen los siguientes aspectos:

- ❖ El V Cone es calibrado en la fábrica. Se entregan los certificados de calibración, y el manual de operación.
- ❖ Puede ser instalado antes y después de codos, no requiere de acondicionamiento del flujo como otras tecnologías de medición de gases y líquidos.
- ❖ Requiere poco mantenimiento.

- ❖ La instalación del equipo es realizado por el personal de la empresa, debido a lo sencillo de su implementación, solo se sugiere que sea bajo la supervisión de Matco Technology C.A.
- ❖ Se requiere un panel de control al cual enviar la señal de presión diferencial, y registre los valores de flujo másico del hidrógeno.
- ❖ Al obtener el volumen de hidrógeno necesario para hidrogenar una carga, se estará asegurando que no exista una sobre alimentación de este, logrando así no favorecer la formación de isómeros trans, además que se llevara un registro del flujo al cual se esta inyectando el hidrógeno, evaluando la forma en que se envía a los reactores.

Implementación de la alternativa C:

- ❖ Disminución de la formación de isómeros trans en el sistema, aumentando así la calidad de los parámetros fisicoquímicos del aceite hidrogenado.
- ❖ Al implementar esta alternativa se podría reducir una hora del tiempo de procesamiento, lo que equivale a producir aproximadamente 4 cargas diarias.
- ❖ Tanto para el sistema Buss como el D'smet se producen 22,5 ton/día c/u. Los sistemas operan 300 días al año lo que equivale a que hay una producción de: 22,5 ton/día * 300 días/año = 6.750 ton/año. Si el aumento es de 4 cargas diarias, se obtiene: 30 ton/día * 300 días/año = 9.000 ton/año.
- ❖ Genera un proceso más eficaz, de mayor producción y menos consumo de energía.
- ❖ Menos riesgo de dañar el material hidrogenado
- ❖ Recuperación del capital invertido: tomando en cuenta que el costo de producción de un kilogramo de base 42 es de BsF 3,50 y el costo del producto en el mercado es de BsF 5,80 se obtiene una ganancia de 2,30 BsF.

Ganancia actual diaria (22.500 Kg): 51.750,00 BsF

Ganancia al implementar la alternativa C: 69.000,00 BsF

Al incrementar un 25% la producción se obtiene una ganancia de 17.250,00 BsF/día lo que equivale al año 5.175.000,00 BsF/año. Si se implementa la automatización la

inversión inicial es de 39.384,13 BsF y la recuperación de esta se obtendría en 3 días hábiles.

Con las alternativas seleccionadas para lograr la mejora del proceso de hidrogenación, se tiene un beneficio el cual no se puede obviar, como lo es la disminución del consumo energético en el proceso, lo cual contribuye a la disminución del calentamiento global.

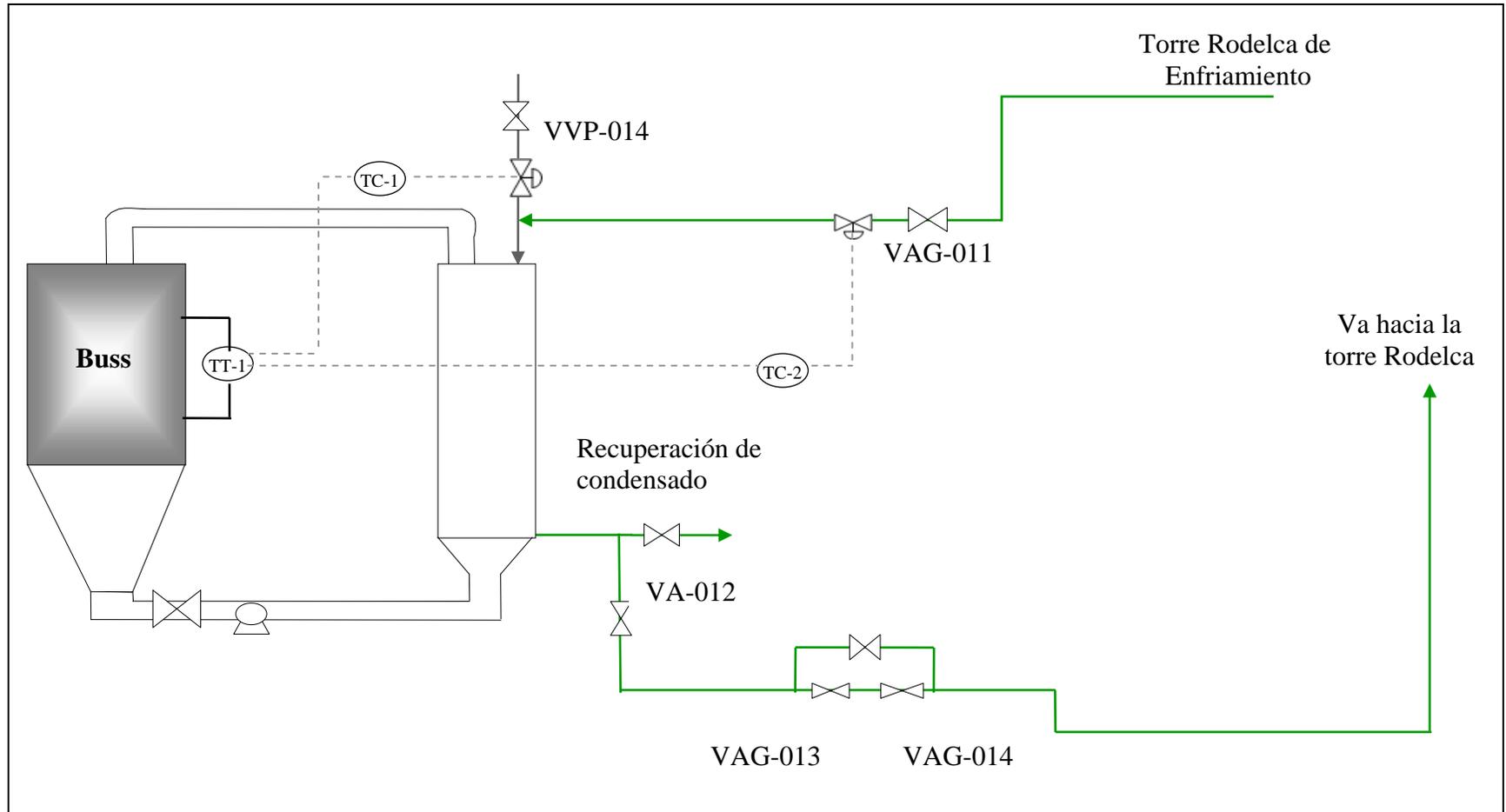


Figura 4.17. Diagrama de automatización del sistema Buss

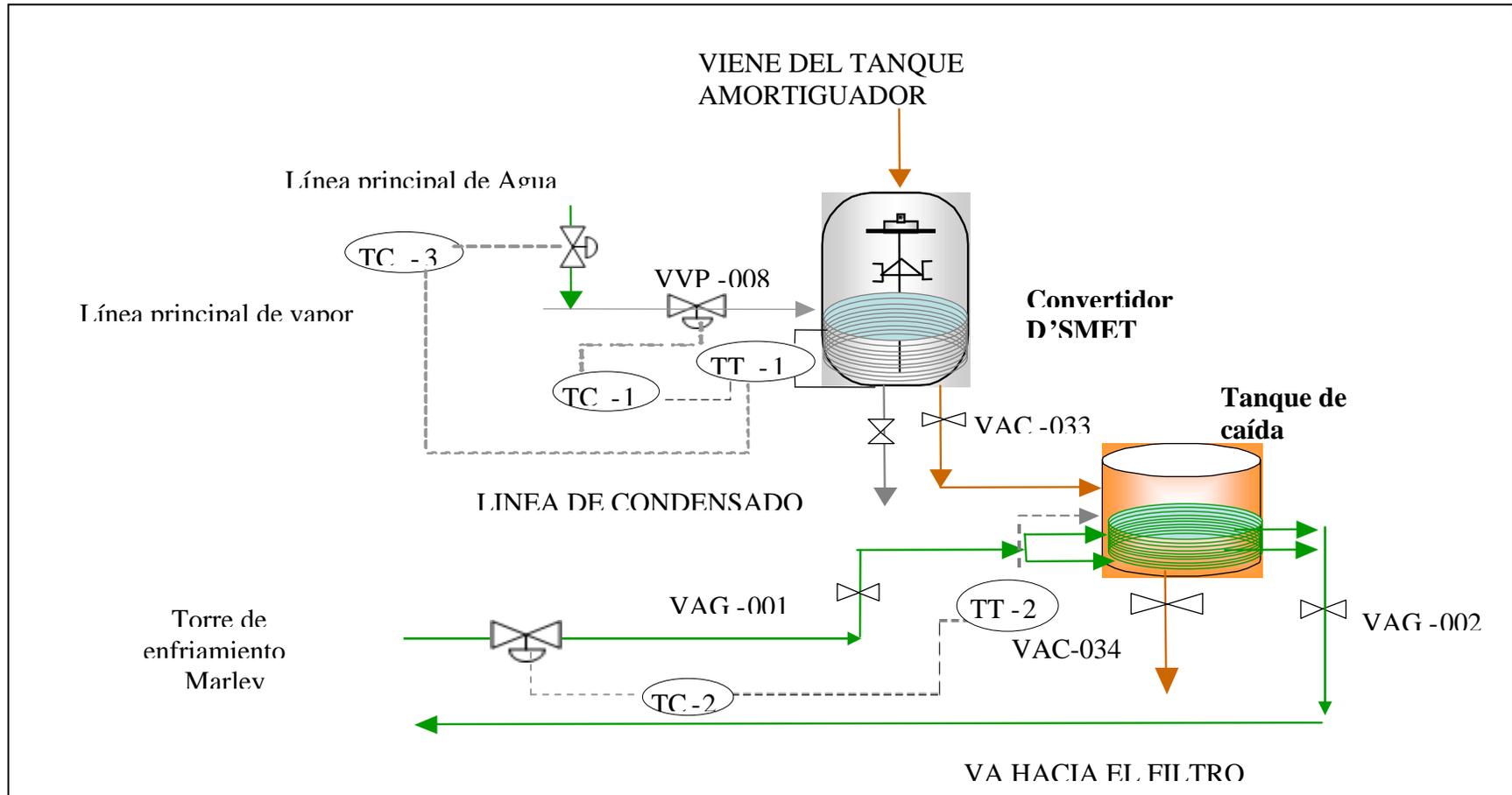


Figura 4.18. Diagrama de automatización del sistema D'smet

En esta sección se presentan trabajos especiales de grado, investigaciones y proyectos semejantes a los perseguidos en esta investigación de manera que sirvan de sustento de la misma, además de los fundamentos teóricos que sustentan la teoría del proceso de hidrogenación.

2.1- Antecedentes

Martínez, Oscar, et al., (2007). **Producción de ésteres etílicos a partir de aceite de palma RBD**. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Investigación. Rev. Ingeniería e Investigación. 27, p 34-43.

En este trabajo se desarrolla una metodología para la obtención de ésteres etílicos del aceite de palma RBD (refinado, blanqueado y desodorizado), evaluando la fase de transesterificación del aceite y la de separación. Entre sus resultados se obtuvo que la presencia de agua en la reacción de transesterificación se traduce en un proceso irreversible de saponificación del aceite, por tal motivo la pureza de reactivos y catalizador es un factor de gran importancia en la obtención de los ésteres etílicos de palma y comparado con los metil y etil ésteres de palma producidos actualmente, el que se obtuvo mediante la metodología encontrada cumple con los mismos parámetros de evaluación y es apto para aplicar en procesos de la industria oleoquímica.

La semejanza de esta investigación es el hecho de que usan el aceite de palma y le aplican el proceso (RBD), la diferencia es que lo realizan para producir esterres etílicos lo cual no es parte de esta investigación.

Ramírez, Alfonso, et al. (2007). **Hidrogenación catalítica del aceite de palma con sistemas bimetálicos tipo cu-ni soportados en ZnO**. Universidad de Cauca. Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias 1, p 42-46.

En esta investigación la hidrogenación del aceite de palma fue llevada a cabo en un reactor tipo Parr empleando un catalizador bimetálico Cu-Ni soportado en ZnO bajo condiciones de reacción no-óptimas (baja presión de hidrógeno y temperatura elevada) buscando obtener la

formación de alcoholes grasos. Entre sus conclusiones se obtuvo que los sólidos tipo Cu-Ni y Ni soportados en ZnO son efectivos para la hidrogenación del aceite de palma transformándolo en una mezcla de alcoholes y ácidos grasos.

Entre sus semejanzas con el presente trabajo es el hecho de que se aplica la hidrogenación catalítica al aceite de palma, pero la diferencia es la finalidad para la que aplican esta hidrogenación catalítica.

Paredes, Luis (2003). **Estudio de catalizadores del sistema Ni-Cu soportado en arcilla y alumina en la reacción de hidrogenación del aceite de girasol**. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Química e Ingeniería Química. Lima. Perú.

Los objetivos planteados en el presente trabajo consistieron en: sintetizar, caracterizar y evaluar la actividad de catalizadores del sistema Ni-Cu soportados en dos soportes diferentes para la reacción de hidrogenación de los aceites. Se estudia el efecto promotor del Cobre sobre el Níquel en catalizadores soportados sobre alúmina y arcilla tipo Bentonita, observando mayor actividad en el catalizador soportado sobre arcilla con fracción molar de 0,75 con respecto al níquel.

La semejanza que tiene este estudio con la presente investigación radica en que ambos emplean el proceso tecnológico de hidrogenación de aceite y la diferencia principal, entre otras, radica en que este estudio tiene como enfoque principal estudiar la incidencia de los catalizadores de Ni-Cu soportado en arcilla y alumina en la reacción de hidrogenación del aceite y esta investigación se orienta en proponer mejoras en el proceso de hidrogenación del aceite de palma, con la finalidad de incrementar la calidad del producto final.

Ajzenberg, Nancy (2002). **Introducción a la hidrogenación de aceite y su implementación en un proceso supercrítico: caso del aceite de girasol**. Universidad Politécnica de Catalunya.

Departamento de Ingeniería Química. Rev. Grasas y Aceites. 53, p 229-238.

En este artículo se muestran los beneficios que aporta la tecnología supercrítica al proceso de hidrogenación de aceite de girasol. Entre las conclusiones más resaltantes se tiene que un fluido supercrítico como solvente de la reacción aporta muchos beneficios importantes en el proceso de hidrogenación de aceite. En primer lugar, el hecho de emplear un fluido supercrítico como solvente baja la producción de isómeros trans de 40 hasta 5%. Luego, mejora la separación del solvente con los productos, evitando una posible contaminación en el producto final. Así, se mejora el proceso en el tema de la salud. Además, los fluidos supercríticos se reciclan fácilmente.

La semejanza más resaltante con respecto a la presente investigación es que en ambos se emplea el proceso de hidrogenación, además del análisis de isómeros cis y trans en el aceite y la diferencia con respecto a la presente investigación es que el proceso de hidrogenación se aplica al aceite de girasol.

Gioielli, Luis, et al., (2001). **Hidrogenación e interesterificación del aceite de castaña de Brasil**. Universidad de Sao Paulo. Facultad de Ciencias Farmacéuticas. Departamento de Tecnología Bioquímica- Farmacéutica. Rev. Grasas y Aceites. 52, p 192-197.

Los objetivos del presente trabajo fueron estudiar la hidrogenación del aceite de castaña de Brasil a diferentes condiciones de proceso y los productos de la interesterificación química de este aceite mezclado con sus grasas hidrogenadas. Entre sus conclusiones está el hecho de variaciones en las propiedades físicas observadas, que se deben a las alteraciones en la composición de los triglicéridos saturados e insaturados. La muestra No. 1, que corresponde a ACB, es la que aumentó considerablemente en todas las propiedades físicas, probablemente debido a la formación de triglicéridos trisaturados (Hoffman, 1989). El mismo efecto observó List et al. (1997), en la interesterificación del aceite de soja y, Marangoni y Rousseau (1998) utilizando aceite de palma.

Entre las semejanzas está el hecho de que utilizan el método de hidrogenación lo cual es parte de esta investigación, la diferencia está en el aceite de castaña de Brasil, el cual no es el empleado en este trabajo. En esta sección se presentan los fundamentos teóricos que respaldan la

investigación, mostrando información general necesaria para la comprensión del tema.

2.2- Marco Teórico

2.3- Generalidades grasas y aceites

Los aceites y grasas son componentes de la dieta humana, que contienen ácidos grasos y vitaminas indispensables para el crecimiento y la salud de los seres humanos. Además la textura, el sabor, el aspecto y otras características sensoriales de muchos alimentos mejoran cuando se les incorpora grasa o son cocinados en aceites, de manera que la gente los prefiere (Mazzani, 1992).

Estas grasas también conocidas como lípidos, son componentes esenciales de las membranas celulares y son necesarios para la absorción y utilización de las vitaminas solubles en grasa; tales como las vitaminas A, D, E y K.

2.4- Lípidos (Badui S., 2006)

Los lípidos son grupos compuestos constituidos por carbono, hidrógeno y oxígeno que integran cadenas hidrocarbonadas alifáticas o aromáticas, aunque también contienen fósforo y nitrógeno. Desempeñan muchas funciones en los tejidos, además de que es la fuente energética más importante, ya que cada gramo genera 9 kcal porque su estructura contiene más átomos de carbono que las proteínas y los hidratos de carbono que producen 4kcal/g cada uno.

Las grasas y los aceites son los principales lípidos que se encuentran en los alimentos, y contribuyen a la textura y en general, a las propiedades sensoriales y de nutrición como se muestra en la tabla 2.1. No hay una distinción entre ambos grupos aun, cuando algunos consideran que las grasas son de origen animal y los aceites de origen vegetal, o bien, las grasas son sólidas a temperatura ambiente, mientras que los aceites son líquidos. Sus principales fuente son las semillas oleaginosas y los tejidos animales, ya que las frutas y hortalizas presentan normalmente muy bajas concentraciones, con algunas excepciones como el aguacate, las aceitunas y algunos tipos de nueces.

El número de sustancias consideradas como lípidos es muy grande y la manera de clasificarla resulta difícil; existen diversos métodos para hacerlo, pero todos se basan en las propiedades físicas o químicas que los caracterizan como se muestra a continuación:

❖ **Lípidos simples:** Esteres de ácidos grasos y alcoholes

Grasas y aceites: esterres de glicerol con ácidos monocarboxílicos.

Ceras: esterres de alcoholes monohidroxilados y ácidos grasos.

❖ **Lípidos compuestos :** lípidos simples conjugados con moléculas no lipídicas

Fosfoglicéridos: esterres que contienen ácido fosfórico en lugar de un ácido graso, combinado con una base de nitrógeno.

\

Glucolípidos: Compuestos de hidrato de carbono, ácidos grasos y esfingosinol, llamados también cerebrósidos.

Lipoproteína: integradas por lípidos y proteínas.

❖ **Lípidos asociados:**

Ácidos grasos

Pigmentos

Vitaminas liposolubles

Esteroles

Hidrocarburos

Tabla 2.1. Contribución de los lípidos en tres atributos de los alimentos

Calidad	Nutrición	Biológico
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Textura, dan consistencia y estructura a muchos productos. ❖ Lubricación y saciedad al consumirlos. ❖ Color, debido a los carotenoides. ❖ Sabor, gracias a las cetonas, aldehídos y derivados carbonilos. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Fuente de energía importante por la β-oxidación. ❖ Vehículo de vitaminas liposolubles. ❖ Son ácidos grasos indispensables linoleico y linolènico. ❖ Promueven la síntesis de miscelas y de bilis. ❖ Facilitan la absorción de las vitaminas liposolubles. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Fuente de vitaminas A D, E y K. ❖ El ácido linoleico es componentes de las acilglucoceramidas de la piel. ❖ Los ácidos piliinsaturados son moduladores en la síntesis de eicosanoides. ❖ El ácido araquidónico es precursor de eicosanoides y lipoxinas. ❖ El ácido docosahexanoico forma parte de las membranas celulares.

Fuente: Badui, Salvador. (2006)

2.5- Ácidos grasos (Badui S., 2006)

En forma pura todas las grasas y los aceites están constituidos exclusivamente por triacilglicéridos (triglicéridos), los que a su vez son esteres de ácidos grasos con glicerol; por consiguiente, dichos ácidos representan un gran porcentaje de la composición de los triacilglicéridos y en consecuencia de las grasas y aceites. Las diferencias de estabilidad a la oxidación, de plasticidad, de estado físico, de patrón de cristalización, de índice de yodo, de temperatura de solidificación y de fusión, de las grasas y los aceites se deben fundamentalmente a sus ácidos grasos constituyentes.

En la tabla 2.2, se muestra el número de ácidos grasos que comúnmente se localizan en los alimentos es muy reducido y solo resaltan unos cuantos.

Tabla 2.2. Ácidos grasos saturados característicos en los aceites y grasas vegetales

Nombre común	Nombre científico	Fórmula general
Ácidos grasos saturados		
Laúrico	n-Dodecanoíco	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$
Mirístico	n-Tetradecanoíco	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
Palmítico	n-Hexadecanoíco	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
Estearico	n-Octadecanoíco	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$
Araquídico	n-Eicosanoíco	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$
Behénico	n-Docosanoíco	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$
Ácidos grasos insaturados		
Palmitoleíco	Cis-9- Hexadecanoíco	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Oleíco	Cis-9- Octadecenoíco	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Linoleíco	Cis-Cis-9,12- Octadecadienoíco	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Linolénico	Cis-Cis-9,12,15- Octadecatrienoíco	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

Los ácidos grasos se producen industrialmente a partir de diversas fuentes de grasas, y se utilizan en la elaboración de aditivos para la industria alimentaria. Los de 16 a 18 átomos de carbono, palmítico, oleico y esteárico, se emplean como emulsionante en forma de sus respectivos esteres.

Para su estudio, los ácidos grasos se han dividido en dos grandes grupos, los saturados y los insaturados.

2.5.1- Ácidos grasos saturados (Badui S., 2006)

Estos ácidos varían de 4 a 26 átomos de carbono y su punto de fusión aumenta con el peso molecular o largo de la cadena; así los de C4 a C8 son líquidos a 25° C, mientras que los C10 en adelante son sólidos, y su solubilidad en agua es inversamente proporcional al peso molecular.

Entre los ácidos grasos más comunes esta el láurico, que abunda en los aceites de palmiste (semilla de la palma) y de coco, el palmítico, que se encuentra en la palma, en el cacao y en la manteca de cerdo, y el esteárico en el cacao y en los aceites hidrogenados.

Los saturados son muchos mas estable que los insaturados, ante la oxidación; sin embargo, en condiciones de temperatura muy alta (más de 180°C), como llega a suceder en el freído, y en presencia de oxígeno, pueden sufrir reacciones oxidativas.

2.5.2- Ácidos grasos insaturados (Badui S., 2006)

Debido a sus insaturaciones, estos compuestos tienen una gran reactividad química ya que son propensos a la saturación y a transformaciones oxidativas y de isomerización. Son muy abundantes en los aceites vegetales y marinos; su temperatura de fusión disminuye con el aumento de las dobles ligaduras, y siempre es menor que la de los saturados para una misma longitud de cadena. Los de una insaturación se llaman monoenoico o monoinsaturados, y a los de mas de una se les denomina polienoico o poliinsaturados; en el primer caso, la mayoría presenta el doble enlace entre los carbonos 9 y 10.

Las insaturaciones presentan dos tipos de isomerismo: a) geométrico, *cis-trans* y b) posicional, según sea la localización del doble enlace en la cadena de átomos de carbonos. En general, los aceites líquidos a temperatura ambiente presentan más insaturados que las grasas sólidas.

2.6- Isomerización de las grasas y aceites (Griguol V., 2005)

Las grasas y aceites presentan isomería *cis-trans* (isomería geométrica) la cual se refiere a la posición que los átomos de hidrógeno tienen alrededor de los dobles enlaces (alquenos). Cuando los átomos de hidrógeno se encuentran en el mismo lado de la cadena, presentan isomería *cis*; si los átomos de hidrógeno se encuentran en lados opuestos presentan isomería *trans*. La configuración de estos isómeros se ilustran en la figura 2.1.

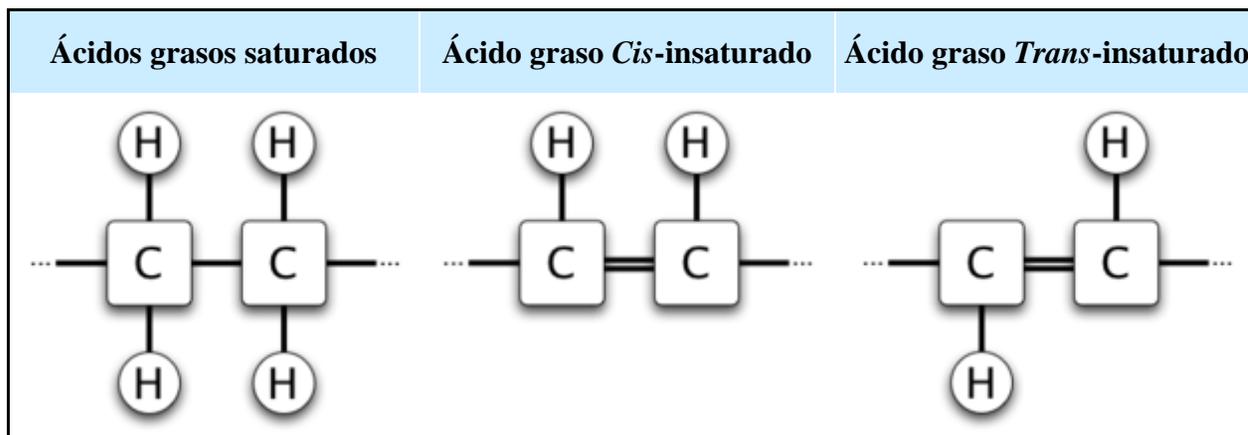


Figura 2.1. Diagrama de la estructura molecular de distintos ácidos grasos

Fuente: Badui, Salvador. (2006)

Los ácidos grasos *trans* se producen como resultado de la hidrogenación de aceites y grasas insaturados, que causa a su vez la isomerización de algunas o de todas las configuraciones naturales tipo *cis* en los dobles enlaces carbono-carbono en los ácidos grasos componentes a la configuración tipo *trans*. Los mayores ácidos grasos *trans* que se forman durante la hidrogenación comercial de aceites y grasas son los isómeros *trans* generados por la hidrogenación de C18:1 con la insaturación en las posiciones 9 y 11. Se suelen considerar nocivos para la salud humana los monoenoos *trans* (ácidos grasos *trans* con un doble enlace), con

cantidades menores de dienos y trienos *trans* generados durante la hidrogenación comercial de aceites y grasas.

2.7- Manufactura de grasas y aceites comestibles (Badui S., 2006)

Las grasas y los aceites provienen de diversas fuentes vegetales y animales; sin embargo, la soya es la oleaginosa que suministra la mayor cantidad de aceite en el mundo, seguida de la palma y de la canola y, en menor grado, de la aceituna, el ajonjolí, el algodón, el cacahuate, el cacao, el cártamo, el coco, el girasol, el maíz y el palmiste.

Los aceites vegetales se extraen de las semillas oleaginosas por prensado o con disolventes. La primera extracción vegetal, produce grasas y aceites llamados crudos que contienen impurezas que se deben eliminar como ácidos grasos libres, proteínas, pigmentos, hidratos de carbono, agua, fosfátidos, etc, que contribuyen al color, sabor, olor, inestabilidad, espumado y otras características indeseables. Sin embargo, algunas de estas sustancias son deseables, como la lecitina y los tocoferoles, que pueden recuperarse parcialmente en la refinación.

El proceso de refinación consiste en purificar el aceite, eliminando algunos ácidos grasos libres, almidón, goma, sustancias colorantes y otras sustancias que hacen al aceite turbio y oscuro en color y con olores indeseables, además de esto es importante remover el fósforo del aceite debido a que este inhibe la acción del catalizador afectando la hidrogenación.

La refinación esta constituida por diversas etapas (desgomado, decoloración y desodorización), las cuales a continuación se describen, estas provocan grandes cambios en la composición del aceite crudo al eliminar o reducir impurezas.

2.7.1- Desgomado

Es la extracción acuosa de compuestos hidrosolubles, como proteínas, hidratos de carbono, agua y fosfátidos, que se separan al establecer una fase inmisible con el aceite. Los fosfátidos en bajas concentraciones, provocan problemas en la refinación, además de que son muy sensibles a la oxidación y producen espuma en el producto terminado. No todos los aceites se someten al desgomado. Al aceite crudo se le añade un 2- 3% de agua se calienta a 50-60°C y la fracción acuosa se separa por centrifugación; los fosfátidos se hidratan, esponjan y precipitan, sobre todo si se incrementa la temperatura, se recuperan y se deshidratan. Al producto resultante se le llama “lecitina”, aunque en realidad contiene una baja proporción de esta; su valor depende del fósforo, elemento que en promedio equivale a casi 4% de un fosfolípido puro.

En el aceite de palma, se utiliza una solución de ácido cítrico al 50% que es agregada en proporción de 0,15% respecto al peso de aceite.

2.7.2- Blanqueo

Este tratamiento se da a los aceites para eliminar pigmentos (carotenoides, clorofilas y xantofilas), aunque en los pasos anteriores se extrae mucho de ellos. Es una adsorción que utiliza agentes adsorbentes como tierras de diatomeas, arcillas neutras derivadas de la bentonita, arcillas ácidas activadas o carbón activado. Este último es el más efectivo, pero es muy caro y al retener mucho aceite, aumenta las mermas; para lograr mejores resultados se mezclan arcillas neutras con 5-10% de carbón activado. El poder decolorante de estos materiales depende de su forma microcristalina y de sus impurezas. Las tierras ácidas deben lavarse, ya que confieren acidez al aceite y provocan su hidrólisis y la liberación de ácidos grasos.

La mezcla aceite/adsorbente se calienta a 80-90°C por 15-20 min para eliminar humedad y activar el material; posteriormente se envía a un filtro prensa y se obtiene por un lado, el aceite y por el otro, el adsorbente que puede regenerarse. En forma ideal, este proceso debe efectuarse a vacío para evitar la acción del oxígeno, ya que los líquidos oxidados reducen la eficiencia. Los aceites ya decolorados pueden desarrollar algunos colores indeseables en el almacenamiento debido a reacciones de oxidación y de polimerización de los ácidos grasos insaturados.

2.7.3- Desodorización

Hasta este punto al aceite crudo ya se le eliminaron ácidos grasos libres, fosfolípidos, agua, proteínas, hidratos de carbono, pigmentos y otros compuestos de alto peso molecular. Sin embargo, todavía contiene altas concentraciones de sustancias volátiles provenientes de la oxidación y responsables de olores indeseables, como cetonas y aldehídos, en ciertos aceites, ácidos grasos libres de menos de 12 átomos de carbono.

El proceso consiste en calentar el aceite a 230-260°C y hacerle circular una corriente de vapor desaireado que arrastra los compuestos volátiles; esto es posible ya que existe una gran diferencia entre la volatilidad de estos últimos y de los triacilglicéridos. El proceso se efectúa a presión reducida (aproximadamente 5mm de Hg) para evitar el deterioro del aceite, aunque en ocasiones se añaden antioxidantes o agentes secuestradores, como el ácido cítrico para eliminar la acción catalizadora de los metales en la oxidación.

Cabe indicar que el material recuperado de la desodorización contiene, además de las sustancias odoríficas, otras de importancia comercial, como son los tocoferoles, tocotrienoles, fitosteroles y ácidos grasos libres; esta se recupera mediante reacciones de esterificación con un alcohol, por saponificación, cristalización, destilación o por extracción fraccionada.

En este punto, la mayoría de los aceites quedan listos para su envasado y distribución, como el que se compra para uso doméstico.

2.8- Hidrogenación de grasas y aceites (Badui S., 2006)

Mediante este proceso se transforman los aceites líquidos en semisólidos o francamente en sólidos, que son más fácilmente manejables y con una mayor vida de anaquel.

En la hidrogenación, los ácidos insaturados están sujetos a 3 transformaciones, que en orden de importancia son: saturación de dobles enlaces; isomerización geométrica *cis-trans*; isomerización posicional como se observa en la figura 2.2. Las características físicas y químicas

de los derivados hidrogenados dependen de la intensidad con que ocurren cada una de estas reacciones; un mismo ácido graso puede presentar al mismo tiempo los dos tipos de isomerización en su estructura.

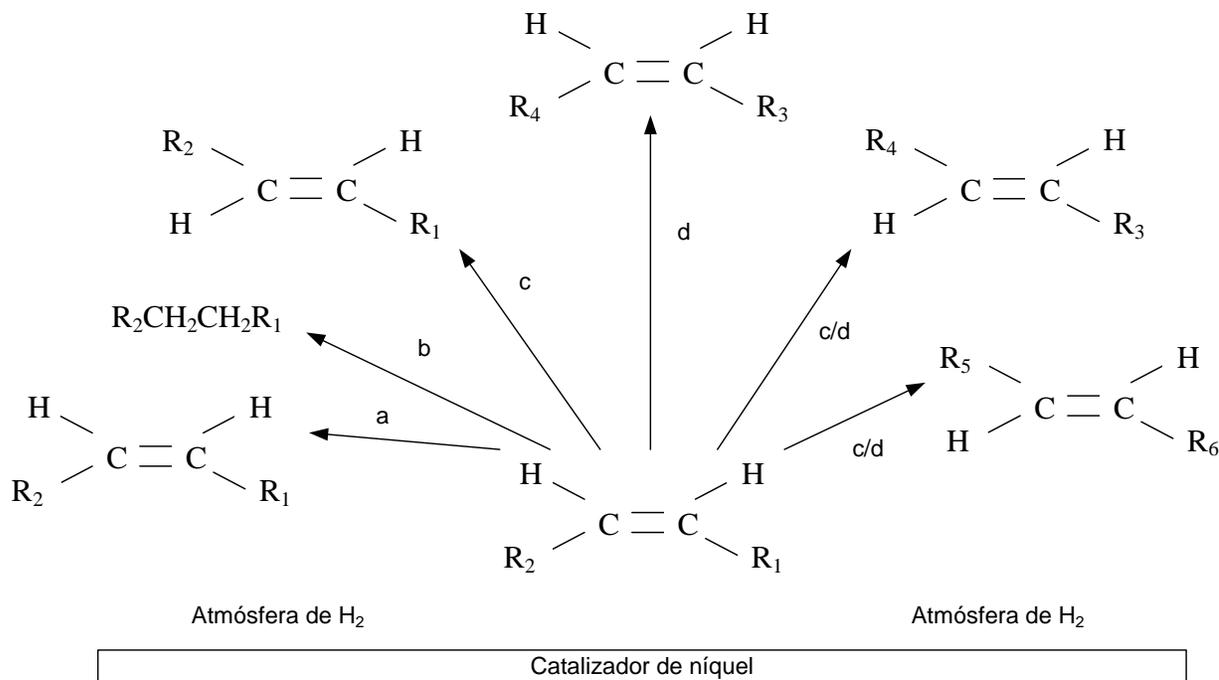


Figura 2.2. Rutas que siguen un doble enlace durante la hidrogenación. a) Ninguna, b) Saturación, c) Isomerización geométrica, d) Isomerización posicional.

Fuente: Badui, Salvador. (2006).

Comúnmente se emplea el sistema por lote (batch): el reactor se carga con aceite y se añaden un 0.1-0.25% de níquel como catalizador, la temperatura varía de 120 a 220°C y se inyecta hidrógeno gaseoso a 1-4atm; se agita continuamente para homogeneizar el catalizador en el líquido y para ayudar a disolver una mayor cantidad del gas. La reacción sucede en un sistema trifásico: el catalizador sólido, triacilglicéridos líquidos y el hidrógeno gaseoso con una solubilidad limitada.

El proceso es exotérmico e incrementa 1.6 °C por unidad de reducción del índice de yodo; la medición del avance se hace con el índice de refracción que depende de los dobles enlaces.

Una vez alcanzada la hidrogenación requerida, se detiene el gas y se enfría hasta unos grados por encima del punto de fusión de la grasa para mantenerla líquida; se pasa por un filtro prensa, en donde se separa el catalizador, que puede o no usarse nuevamente. En general, para bajar una unidad de índice de yodo se requiere aproximadamente 1m^3 de H_2 /ton de aceite.

En la tabla 2.3 se muestra la velocidad relativa de hidrogenación de los ácidos grasos de acuerdo con su insaturación; se observa que el linolénico, por ser el más insaturado, es el que más rápido se hidrogena y también se oxida.

Tabla 2.3. Velocidades relativas de oxidación y de hidrogenación

Ácidos grasos	Índice de yodo	Velocidad relativa de oxidación	Minutos necesarios para absorber 1g de oxígeno/Kg de aceite a 100°C	Velocidad relativa de hidrogenación
Esteárico	0	0	1,250	0
Oleico	86	10	115	1
Linoleico	173	100	11	20
Linolénico	260	150	7	40

Fuente: Badui Salvador. (2006).

Para hidrogenarse, el aceite debe estar refinado y seco; un contenido de agua $>0.05\%$ a temperaturas altas, inducen la hidrólisis de los triacilglicéridos y la liberación de ácidos grasos que envenenan el níquel, además de que se concentran en el espacio superior del reactor e impiden la circulación del hidrógeno.

El H_2 debe ser puro (99.5% mínimo), estar seco y libre de gases como CO , NH_3 y CO_2 que bajan su presión parcial o envenenan el Ni. Se produce más puro por electrólisis que por la

reformación del propano.

Como catalizador, los cristales (50-100 Å) del níquel esponjoso deben presentar una gran área superficial (p. ej., 90 m²/g); además de los agentes antes mencionado, se envenena con jabones, halógenos, fosfátidos, aire disuelto, fosfolípidos, metales, fósforo y azufre; los aldehído y cetonas de la oxidación de los lípidos y las grasas con índice de peróxido alto, se absorben con mayor facilidad en el metal e inhiben su actividad.

Existen otros elementos químicos (Pt, Rh y Pd) que son catalizadores, pero cuyo empleo es muy escaso por ser caros y muy sensibles al envenenamiento por Pb, As y S. Se pueden usar a bajas temperaturas con un mínimo de producción de ácidos trans, pero generan muchos saturados. La hidrogenación selectiva es cuando los ácidos mas insaturados se convierten primero; es decir, un linolénico se transforma en linoleico antes de que este se vuelva oleico y, a su vez, éste ultimo se convierte en esteárico solo después que desaparece el linoleico. Por cuestiones económicas, los fabricantes prefieren la hidrogenación no selectiva debido a que se lleva a cabo mas rápidamente; la mayor cantidad de los ácidos linolènico y linoleico se transforman directamente en esteárico.

Como se mencionó anteriormente, en la etapa de hidrogenación ocurre la saturación, pero también, en menor grado, las isomerizaciones geométricas y posicional. La presencia de los trans es importante ya que se comportan como uno saturado; por ejemplo el linoleico es cis-cis, pero si es uno de sus dos dobles enlaces se isomeriza a cis-trans o trans-cis, presenta un punto de fusión semejante al del oleico.

Los ácidos monoinsaturados tienen dos posibles isómeros, el cis o el trans; pero los diinsaturados pueden tener los cis-trans, trans-trans, trans-cis y cis-cis; en el caso de los triinsaturados, el número de posibles isómeros aumenta considerablemente.

Un enlace insaturado en la superficie del catalizador tiene dos caminos: se combina con el gas adsorbido para dar uno saturado, o bien se desadsorbe y regresa como cis o trans debido a reacciones de hidrogenación y de deshidrogenación. Una mayor cantidad de hidrógeno alrededor

del níquel favorece la saturación, mientras que poco gas favorece la isomerización geométrica. Las altas temperaturas incrementan la velocidad de reacción, pero también remueven y reducen el hidrógeno disponible, lo que facilita la selectividad y la formación de trans. Una mayor agitación mejora el contacto gas/aceite y favorece la adsorción sobre el catalizador y la saturación. Cuando los catalizadores se reutilizan o contienen azufre y están envenenados, no adsorben hidrógeno y propician la isomerización. Para evitar la formación de trans se recomienda emplear bajas temperaturas y un catalizador nuevo.

El tercer efecto de la hidrogenación sobre los ácidos grasos insaturados es la isomerización posicional. Además de estos ácidos grasos, existen otros compuestos con doble enlace que también se hidrogenan y se isomerizan, tal como sucede con los que tienen grupos cromóforos, como los carotenoides y las vitaminas liposolubles, principalmente la A.

Por todo lo expuesto, se concluye que las propiedades físicas (punto de fusión, plasticidad, valores N, etc) de una grasa parcialmente hidrogenada dependen directamente del grado de saturación que se obtenga, así como de la concentración de sus isómeros geométricos y posicionales.

2.9- Aspectos nutricionales (Badui S., 2006)

En los últimos años se ha generado mucha información inadecuada sobre el consumo de grasas y aceites, al grado que incluso se ha sugerido reducirlos sustancialmente de la dieta del hombre. Sin embargo, estas consideraciones resultan incongruentes cuando se enumeran todos los compuestos con que los lípidos contribuyen al bienestar de las personas. Es un hecho que, por ser una excelente fuente de energía, su consumo excesivo provoca obesidad si no hay una adecuada actividad física.

Una alta ingesta de ácidos grasos saturados, principalmente láurico, mirístico y palmítico, conlleva el aumento del colesterol sanguíneo mediante la síntesis de las lipoproteínas de baja densidad, llamado colesterol malo. Por el contrario, los ácidos grasos insaturados, promueven la producción de lipoproteínas de alta densidad o colesterol, llamado colesterol bueno.

Se considera que del total de los lípidos que una persona ingiere al día, las grasas visibles, como la margarina, el aceite para freír, las cremas, la grasa de la carne y la mantequilla, representan aproximadamente el 30% mientras que las invisibles, que son añadidas en la formulación de los alimentos suman 70%.

Aun existe mucha controversia sobre los efectos biológicos que los ácidos grasos trans causan en el organismo humano. Se sabe que absorben, metabolizan e incorporan a los tejidos de igual forma que los cis pero no presentan actividad biológica; al actuar como un ácido graso saturado, se han relacionado con el aumento del colesterol sanguíneo, la síntesis inadecuada de lipoproteínas, el desarrollo de muchas enfermedades cardiovasculares y hasta el cáncer.

2.10- Generalidades del aceite de palma africana (Calvo M., 2004)

Las palmeras aceiteras, que pertenecen a dos especies vegetales, *Elaeis guineensis* y *Elaeis oleifera*, son originarias de África Central y Occidental, y se han utilizado para extraer aceite para uso alimentario al menos desde hace 5.000 años. A partir del siglo XVI se trasladaron a otros lugares, donde actualmente se producen cantidades importantes de aceite de palma. Actualmente la palma de aceite se cultiva en Malasia (casi la mitad de la producción mundial) e Indonesia, que son los principales productores, en Colombia y otros países de Sudamérica y en todos los países del centro y oeste de África.

La palmera de aceite es muy productiva. De cada árbol puede obtenerse anualmente hasta 20 toneladas de racimos cada año. Tanto la pulpa del fruto como la semilla contienen alrededor del 50% de aceite. El aceite de palma tal como se extrae contiene alrededor del 3,5% de lípidos polares, fosfolípidos y glicolípidos, siendo el resto triglicéridos. Los ácidos grasos fundamentales el palmítico y el oleico, predominando uno u otro según la especie, variedad y condiciones de cultivo.



La característica más llamativa de este aceite es el intenso color rojo que tiene cuando no ha sido refinado, debido a la presencia de carotenoides, en concentraciones muy elevadas, entre 600 y 6000 mg/kg. El carotenoide predominante es el β - caroteno, que representa unos dos tercios del total, siendo el resto fundamentalmente α -caroteno. El aceite de palma también es un aceite rico en tocoferoles.

2.10.1- Composición y propiedades del aceite de palma (Cottrel., 1991)

En cuanto a su composición, el aceite de palma podría clasificarse como insaturada o como saturada, ya que contiene proporciones similares de los dos tipos de ácidos grasos, contiene aproximadamente un 50% de ácidos grasos saturados, un 40% de los ácidos grasos monoinsaturados y un 10% poliinsaturados, como se expone en la tabla 2.4. Adicionalmente en la tabla 2.5, se muestran las principales propiedades químicas y físicas del aceite de palma y de otros aceites provenientes del fruto de la palma.

Tabla 2.4. Contenido de ácidos grasos en aceites de palma, palmiste y oleína de palma

Ácidos grasos	Palma	Palmiste	Oleína de palma
Láurico (C 12:0)	0,5 – 2,0	48,0 – 60,0	<0,1
Mirístico (C 14:0)	0,5 – 2,0	14,0 – 16,0	<1,0
Palmítico (C 16:0)	41,0 – 47,0	6,5 – 10,0	35,0 – 40,0
Palmitoléico(C16:1)	<0,6	--	<0,2
Estearico (C 18:0)	3,5 – 6,0	1,3 – 3,0	3,0 – 4,0
Oleico (C 18:1)	36,0 – 44,0	12,0 – 19,0	40,0 – 46,0
Linoléico (C18:2)	6,5 – 12,0	1,0 – 3,5	10,0 – 12,0
Linolénico (C18:3)	<0,5	--	<0,4
Otros	<1,5	<1	<0,5

Fuente: Firestone. (1999). Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats and Waxes. AOCS Press.

Tabla 2.5. Características de los aceites provenientes de la palma

Propiedades	Aceite de Palma	Oleína de Palma	Estearina de Palma	Aceite de Palma Kernel
Índice de Saponificación (mg KOH/g)	190 – 209	194-202	193-205	230-254
Materia Insaponificable (g/Kg)	<12	<13	<9	<10
Índice de Yodo	50–55	56-61	21-46	13-23
Punto de Fusión (°C)	34–38	22-24	48-52	24-26
Densidad Relativa	0,891-0,899	0,900-0,908	0,881-0.892	0,899-0,914
Índice de Refracción $n_D(40-50^\circ C)$	1,449-1,455	1,458-1,459	1,447-1,451	1,448-1,452

Fuente: CODEX. (1993); PORIM. (1995)

El aceite de palma también contiene algunos componentes que dotan el aceite de propiedades nutritivas y beneficiosas, principalmente debido a la ausencia de isómeros de ácidos grasos trans en su estructura. Los componentes menores del aceite fresco de la palma son los carotenos, vitamina E, esteroides, fosfolípidos, glicolípidos y escualeno (tabla 2.6).

Tabla 2.6. Componentes menores del aceite de palma

Componente	Rango (ppm)
Carotenos	500-800
Esteroles	360-620
Escualenos	429-979
Vitamina E	600-1000
Fosfolípidos	5-130
Glicolípidos	1000-3000

Fuente: Hassan AH (1988) Palm oil and health.

2.10.2- Impurezas y calidad del aceite de palma (Jacobsberg., 1983)

Las impurezas que se encuentran en los aceites crudos pueden agruparse según sus efectos:

- (a) Hidrolíticos, como por ejemplo: la humedad, la suciedad, ácidos grasos, glicéridos parciales y enzimas.
- (b) Oxidativos, como por ejemplo: trazas de metales, productos de oxidación, pigmentos, tocoferoles y fosfátidos.
- (c) Contaminantes del catalizador, como por ejemplo: compuestos que contienen nitrógeno, azufre y halógenos (también los fosfátidos y productos de oxidación).

El aceite de palma, es similar a otros aceites con respecto a los efectos de las impurezas antes mencionadas, sobre la calidad del aceite refinado. Por consiguiente, es necesario determinar valores analíticos claves, con la finalidad de predecir la calidad del aceite desodorizado proveniente del aceite crudo. Las pruebas de más importancia para determinar la calidad del aceite de palma crudo son:

- ❖ % Humedad.

- ❖ % Suciedad o impurezas.
- ❖ % Ácidos grasos libres (FFA).
- ❖ Índice de yodo (IV).
- ❖ Índice de peróxido (PV), mili-equivalente de oxígeno activo por Kg; que es una medida de los productos primarios de oxidación.
- ❖ Índice de p-Anisidina (AV), que es una medida de la cantidad de aldehídos (productos secundarios de la oxidación) en el aceite y da referencia del grado de tratamiento térmico al cual es sometido el aceite, lo que afecta la estabilidad del mismo.
- ❖ El contenido de carotenos (ppm), como una medida de la oxidación y blanqueabilidad. Un valor bajo implica oxidación del aceite crudo, con la consecuente fijación de color.
- ❖ El contenido de hierro; porque este es responsable en la fijación del color y de aumentos en la velocidad de oxidación.
- ❖ La absorbancia ultravioleta (*nm*); que es una medida de los trienos conjugados y productos secundarios de oxidación, esta indica si el aceite se ha sobrecalentado o no. Valores altos indican que el aceite se ha sobrecalentado, lo que resulta en fijación de color.
- ❖ El test de blanqueabilidad. (Pruebas de Bernam o Hoffmann/I.A.S.C).
- ❖ El contenido de jabón (ppm).
- ❖ Los valores guías para los parámetros anteriores, son mostrados en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Especificaciones de calidad para el aceite de palma procesado

Test	Fuente	1	2	3	
		Codex Alimentarius	PORIM	H&C	
				Standard	Lotox
Ácidos grasos libres FFA (%)		Valor ácido 10max	0,05 max	3,5 max	2,5 max
Impurezas		0,05 max	0,05 max	0,02	0,02
Color (5 ¼) Lovibond		--	3 o 6 rojo	--	--
Índice de Yodo		50-55	50-55	53-55	53-55
Índice de Peroxido (PV)		10 max	1 max	5	3 max
Índice de Anisidina		--	8 max	--	4 max
Fe (ppm)		5 max	0,12 max	5	3
Cu (ppm)		0,4 max	0,05 max	0,2	0,2
Absorbancia UV		--	8 max	--	≤0,3
Jabón (ppm)		50 max	--	--	--

1. Norma Internacional para el Aceite de Palma Virgen- Codex alimentarios; 2. PORIM; 3. Harrisons & Crosfield Ltd; clasificaciones para el aceite de palma al momento de embarque. (1993).

A nivel de proceso, los factores que afectan principalmente la calidad del aceite, son los generados a partir de la oxidación y la fijación de color. Por consiguiente, los parámetros de calidad que cobran mayor importancia a la hora de la comercialización y consumo son: el índice de peroxido y de anisidina, el contenido de hierro y carotenos, la absorbancia ultravioleta y el test de blanqueabilidad. (Jacobsberg., 1983).

2.11- Proceso de hidrogenación de palma africana

A la palma cruda que ingresa a la planta se le realiza un proceso de refinación física, la cual tiene como fin disminuir el grado de acidez y fósforo presente en el aceite; se pone en contacto con una solución de ácido cítrico a una temperatura de 90 °C, luego este aceite pasa a la etapa de blanqueo, de manera que disminuya la coloración de dicho aceite y elimine la cantidad de gomas presentes y compuestos oxidantes, además de remover pigmentos (carotenoides y clorofila).

Después que el aceite es blanqueado es enviado a la etapa de desodorización, donde se disminuye su acidez para posteriormente ser enviado al proceso de hidrogenación, en el cual sus propiedades fisicoquímicas son modificadas a través de los sistemas de conversión. El reactor de hidrogenación es una unidad de procesos en una serie de operaciones a las cuales se refiere comúnmente como planta de endurecimiento.

El reactor recibe aceite no hidrogenado, hidrógeno y catalizador. El aceite es calentado con vapor indirecto hasta la temperatura necesaria (150 °C), un tanque que contiene catalizador niquelado es bombeado hacia el reactor y el hidrógeno se introduce al final. El hidrógeno disuelto cuando se combina con el catalizador es capaz de romper y sumarse molecularmente a un doble enlace en el aceite. Finalmente se procede al enfriamiento y la eliminación del catalizador.

A continuación en la figura 2.4 y 2.5, se exponen los diagramas de bloque del proceso de hidrogenación para el sistema D'smet y Buss respectivamente.

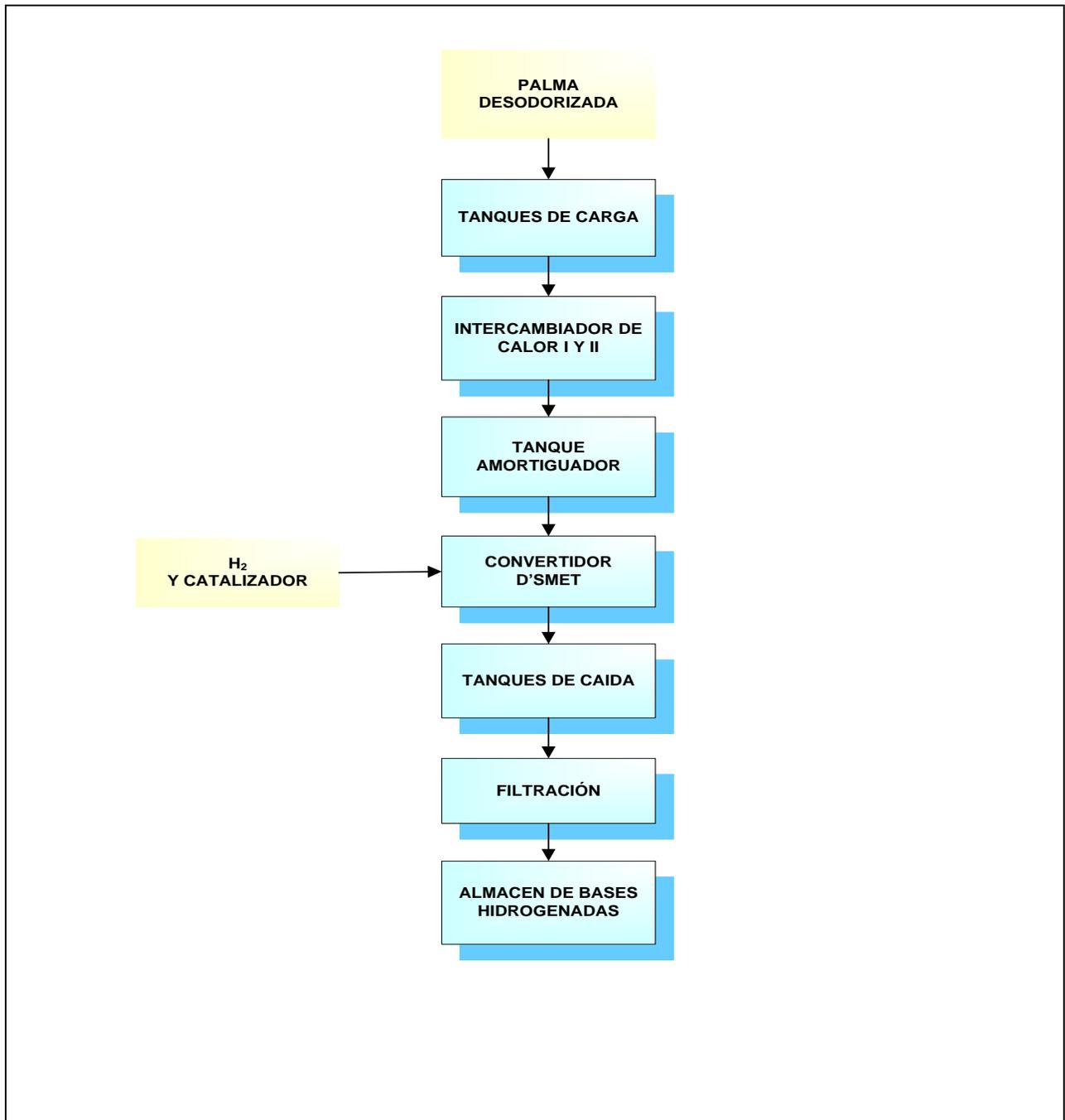


Figura 2.4. Diagrama de bloque del proceso de hidrogenación del aceite de palma en el convertidor D'smet.

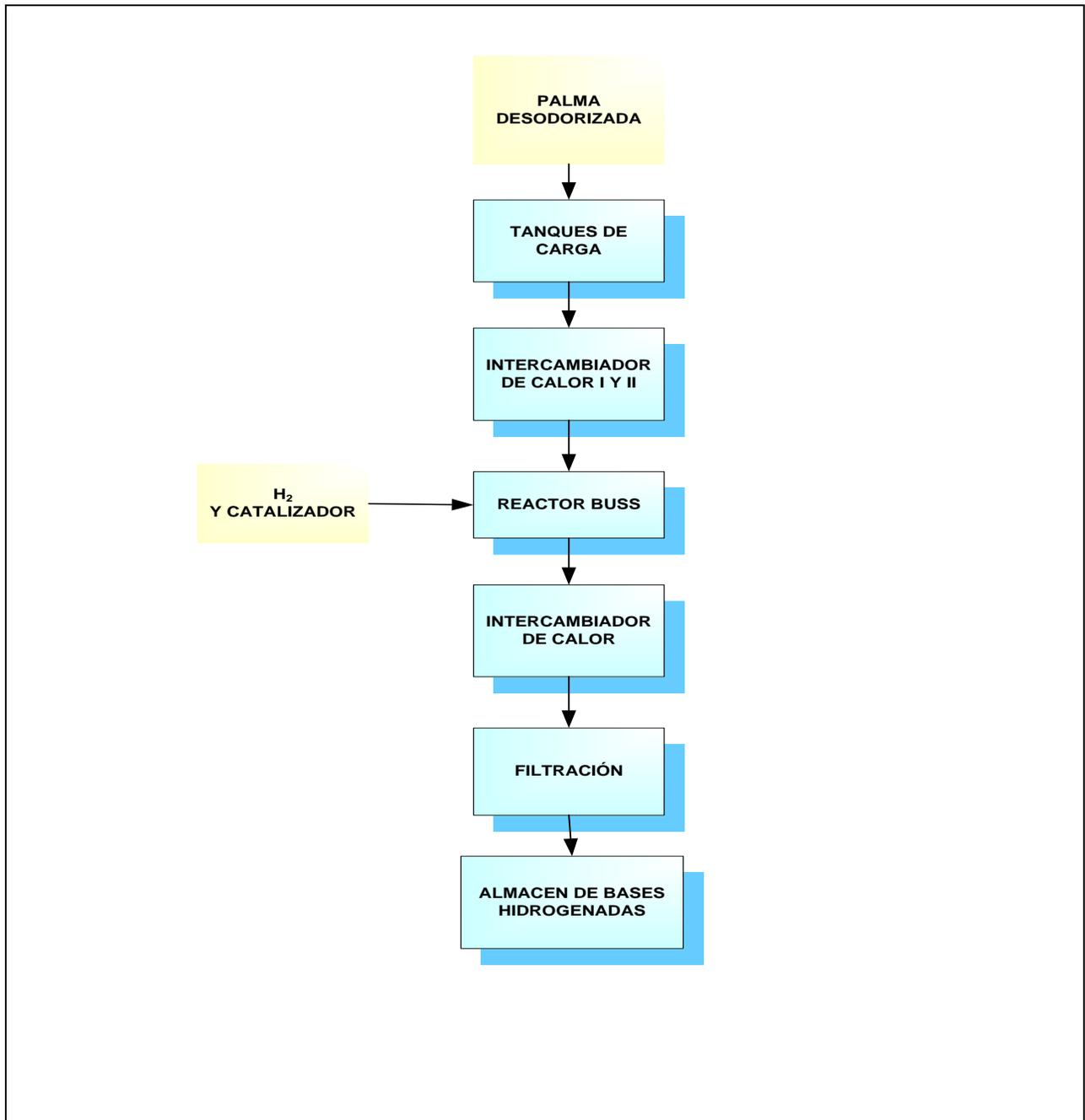


Figura 2.5. Diagrama de bloque del proceso de hidrogenación del aceite de palma en el reactor Buss.

2.12- Etapas involucradas en el proceso de hidrogenación

2.12.1- Almacenaje

La palma pasa por una etapa de desodorización en el cual se elimina olor y disminuye color. La palma desodorizada antes de entrar al proceso de hidrogenación debe estar libre de jabón, con 0% de humedad y acidez baja. Esta normalmente se encuentra a temperatura ambiente y es almacenada en tanques cerrados, los cuales tienen una capacidad de 100 m³.

2.12.2- Tanques de carga

Los tanques de carga están denominados como tanque B-1 y romana, en los cuales se carga la palma ya desodorizada anteriormente, la romana posee un sensor; el cual indica a través de una alarma si ya se ha llenado el tanque en su totalidad, generalmente este tanque tiene una carga de trabajo de 7,5 toneladas de aceite. El tanque B-1 posee un lazo de control de nivel, una vez que dicho tanque se encuentra lleno en su totalidad, el sensor emite una señal a la válvula, la cual se cierra automáticamente.

2.12.3- Intercambiadores de calor I y II

El aceite de palma antes de ser enviado a los reactores, es sometido a un calentamiento para facilitar tanto su transporte como el proceso de hidrogenación, para dicho calentamiento se emplean dos intercambiadores de calor de tubo y coraza en posición horizontal, donde el aceite se transporta por los tubos y el vapor por la coraza. El primer intercambiador de calor posee 185 tubos en total, dichos tubos tienen un diámetro de 1 pulgada y una longitud de 5000mm, la temperatura del aceite a la salida del intercambiador es de aproximadamente 80°C. El segundo intercambiador posee 124 tubos en total y 2 de ellos se encuentran inactivos, al igual que el primer intercambiador los tubos tienen un diámetro de 1 pulgada y la temperatura del aceite a la salida puede alcanzar los 120°C.

2.12.4- Sistema D'smet

Una vez que el fluido sale de los intercambiadores de calor es transportado al tanque amortiguador, el cual se observa en la figura 2.6, el cual posee un serpentín interno para

precalentar la carga manteniendo la temperatura (actualmente el serpentín no está operativo). Este tanque se encuentra a una presión de vacío entre (-0.3 a -0.5) Kg/ cm², dicho tanque posee una capacidad de 7,5 m³, una altura de 3,82m y un diámetro de 3,12 m.

El aceite que se encuentra en el tanque amortiguador cae al convertidor por gravedad, generando vacío en el reactor, este posee una capacidad de 12 m³ y un diámetro de 1,1m. Una vez que está en el convertidor se procede a calentar el aceite a través de un serpentín interno construido en hierro negro, por el cual circula vapor proveniente de la caldera a una presión de 160 psi, una vez que se alcanza una temperatura de 160 °C se cierra el suministro de vapor y se adiciona el catalizador de níquel. Este catalizador tiene como nombre comercial Calsicat, su presentación es granulada de color gris oscuro y con un porcentaje de Níquel de 23,5% mínimo. Este catalizador puede suministrarse de dos maneras diferentes, se puede agregar de forma directa a través de un embudo que se encuentra en la parte superior del equipo y se puede succionar del tanque de mezcla de catalizador, donde se encuentra una composición de aceite y catalizador.

Para realizar la inyección de hidrógeno es necesario cerrar el vacío, de esta manera se procede a abrir la válvula de hidrogeno, este hidrogeno es suministrado por la parte inferior del reactor a una presión de 2,5 kgf/cm², dando inicio a la reacción de hidrogenación al ponerse en contacto con el aceite. El convertidor D'Smet es un tanque equipado con un agitador tipo turbina de hoja curva en un eje rotatorio fijado en alrededor de 110-120 rpm. El hidrógeno se introduce a través de un distribuidor tipo estrella ubicado en la parte inferior, este rompe el gas en diminutas burbujas, lo que aumenta su superficie.

El agitador también dispersa las burbujas, frenando así la subida del gas en el convertidor. Una vez homogenizada la mezcla, el hidrógeno se encuentra disponible para unirse con un doble enlace al aceite en la superficie del catalizador.

Este tipo de reactor se conoce como "callejón sin salida" porque no hay medios externos para el reciclado de hidrógeno a la parte inferior del convertidor. Es esencial que el hidrógeno se mezcle para que la reacción de hidrogenación tenga lugar y la agitación forma parte importante

de este proceso. Esta reacción es exotérmica, por lo que libera gran cantidad de calor y debe controlarse la temperatura.

La hidrogenación no termina hasta que se hayan obtenido los análisis del punto de fusión e índice de refracción del laboratorio, ya que estos determinan si el aceite ha llegado a los parámetros requeridos. Después de esto se procede a cerrar la válvula de inyección de hidrogeno.

2.12.5- Tanque de caída

El aceite ya hidrogenado, es enviado al tanque de caída por gravedad y al vacío, el cual está construido de acero inoxidable y esta provisto de un serpentín interno, con el fin de enfriar el aceite con agua proveniente de la torre de enfriamiento hasta aproximadamente 80 °C. Este tanque posee una capacidad de 12m³, una altura de 2,42m y un diámetro de 2,4 m.

2.12.6- Sistema Buss

Una vez que el aceite de palma es calentado en los intercambiadores de calor, es bombeado al reactor Buss, el cual se muestra en la figura 2.7, el cual tiene un volumen de 7,5 Ton, donde al generarse vacío se procede a calentar el aceite, esto se realiza mediante un intercambiador vertical de tubo y coraza, donde el aceite pasa por los tubos y el vapor por la coraza, dicho aceite es recirculado por bombeo al reactor hasta alcanzar una temperatura de 160°C aproximadamente.

Una vez calentado el aceite se suministra el catalizador que proviene del tanque mezclador de catalizador; se procede a eliminar el vacío con el fin de que al suministrarse el hidrogeno, este no se pierda o fugue y pueda dar paso a la reacción.

Este hidrógeno se suministra por la parte superior a una presión de 2.5 Kgf/cm². El hidrógeno interactúa con el aceite mediante una agitación, esta se logra por arrastre de hidrógeno en fracciones líquido /catalizador que circulan a través de un tubo tipo Venturi con boquilla a alta velocidad. La boquilla actúa como un dispersor mezclando el aceite y el gas hidrógeno de forma eficiente.

Para determinar si el aceite cumple con los parámetros establecidos, se realiza el análisis en el laboratorio del punto de fusión e índice de refracción, de manera que si cumple, se cierra el suministro de hidrógeno. Después de hidrogenar es necesario enfriar el aceite, para esto se suministra agua proveniente de la torre de enfriamiento al intercambiador de calor y mediante la recirculación se lleva el aceite a una temperatura aproximada de 80°C.

2.12.7- Filtración catalítica

El aceite luego de ser enfriado pasa a una etapa de filtración, cuyo fin principal es eliminar el níquel utilizado en la reacción, esta etapa se lleva a cabo en un filtro prensa, el cual está constituido por placas de acero y cuatro capas o cámaras filtrantes o celdas, cada celda está formada por un marco, cerrado a ambos lados por telas sintéticas y papel de filtro, a este último se le realiza una pre-capa con aceite y ayuda filtrante con el fin de retener impurezas y la mayor cantidad posible de catalizador. Las placas y marcos son de aluminio y tienen un área de 1m².

Existen dos filtros catalíticos, uno para el convertidor D'Smet y otro para el reactor Buss, cada filtro tiene en total 35 placas, es de importancia el hecho de que el aceite debe quedar lo más limpio, libre de impurezas y partículas de tierra como sea posible.

2.12.8- Almacenamiento de material hidrogenado

Los tanques denominados del H1 al H6 tienen como fin almacenar las bases hidrogenadas, donde los tanques H2 y H6 poseen una capacidad de almacenamiento hasta de 6 cargas, mientras que los tanques restantes pueden almacenar un máximo de 4 cargas, luego pasan a los tanques donde se almacenan las bases hidrogenadas preparadas, estos se denominan H7, H8, H9. Una vez que estas se almacenan se envían al proceso de producción de margarina y manteca.

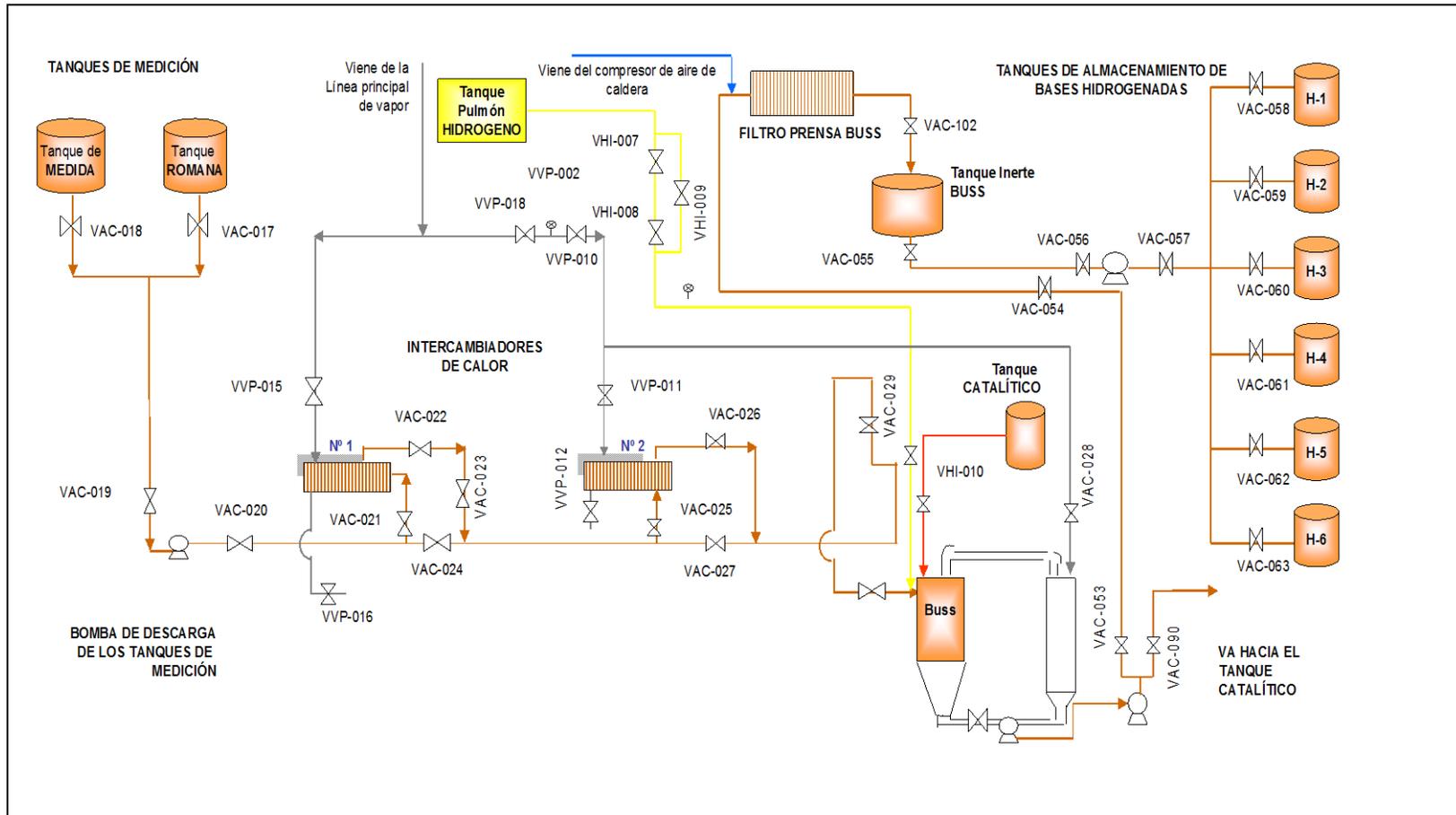


Figura 2.7. Diagrama de flujo del proceso de hidrogenación del aceite de palma en el reactor Buss

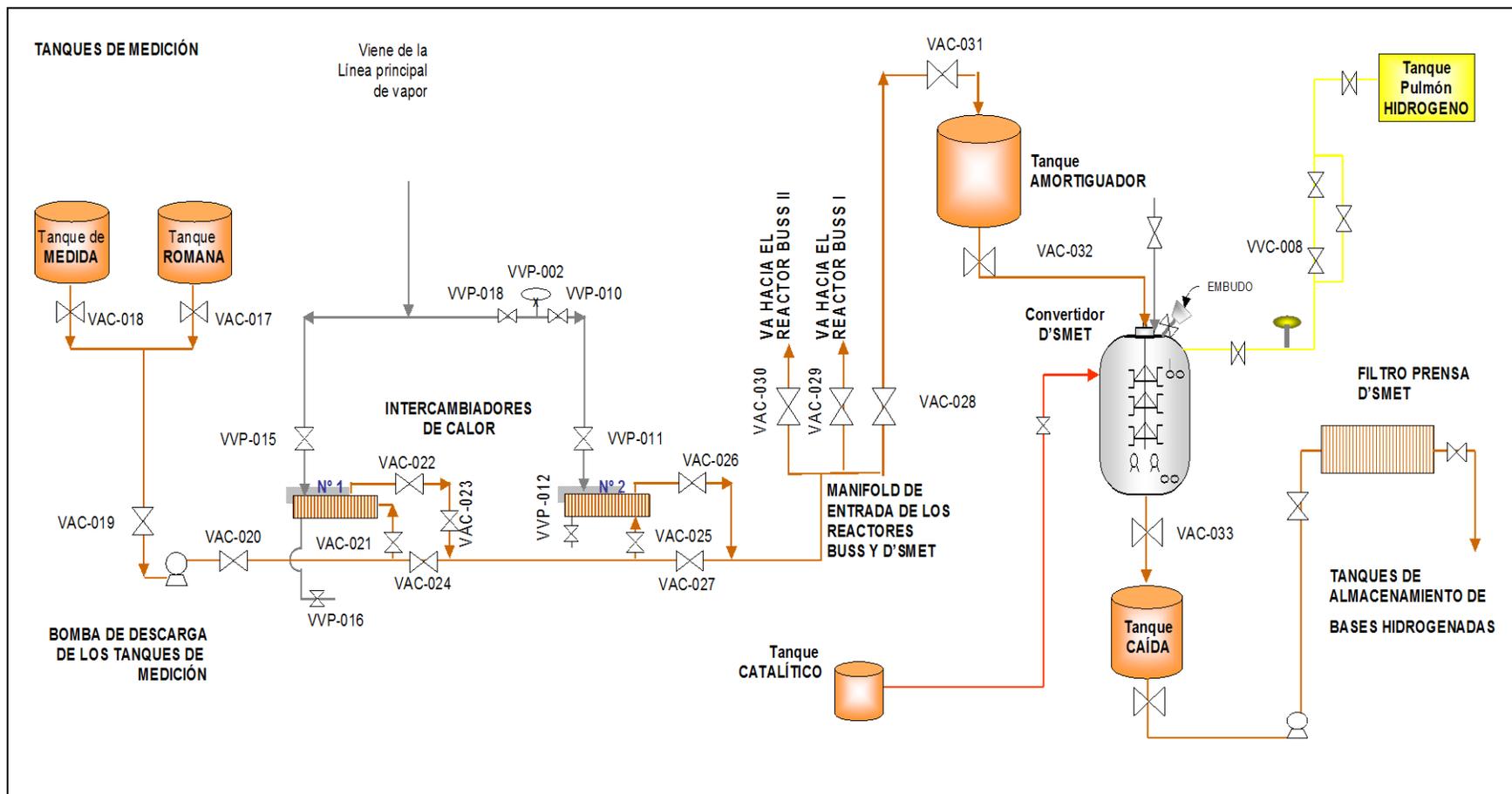


Figura 2.6. Diagrama de flujo del proceso de hidrogenación del aceite de palma en el convertidor D'Smet.

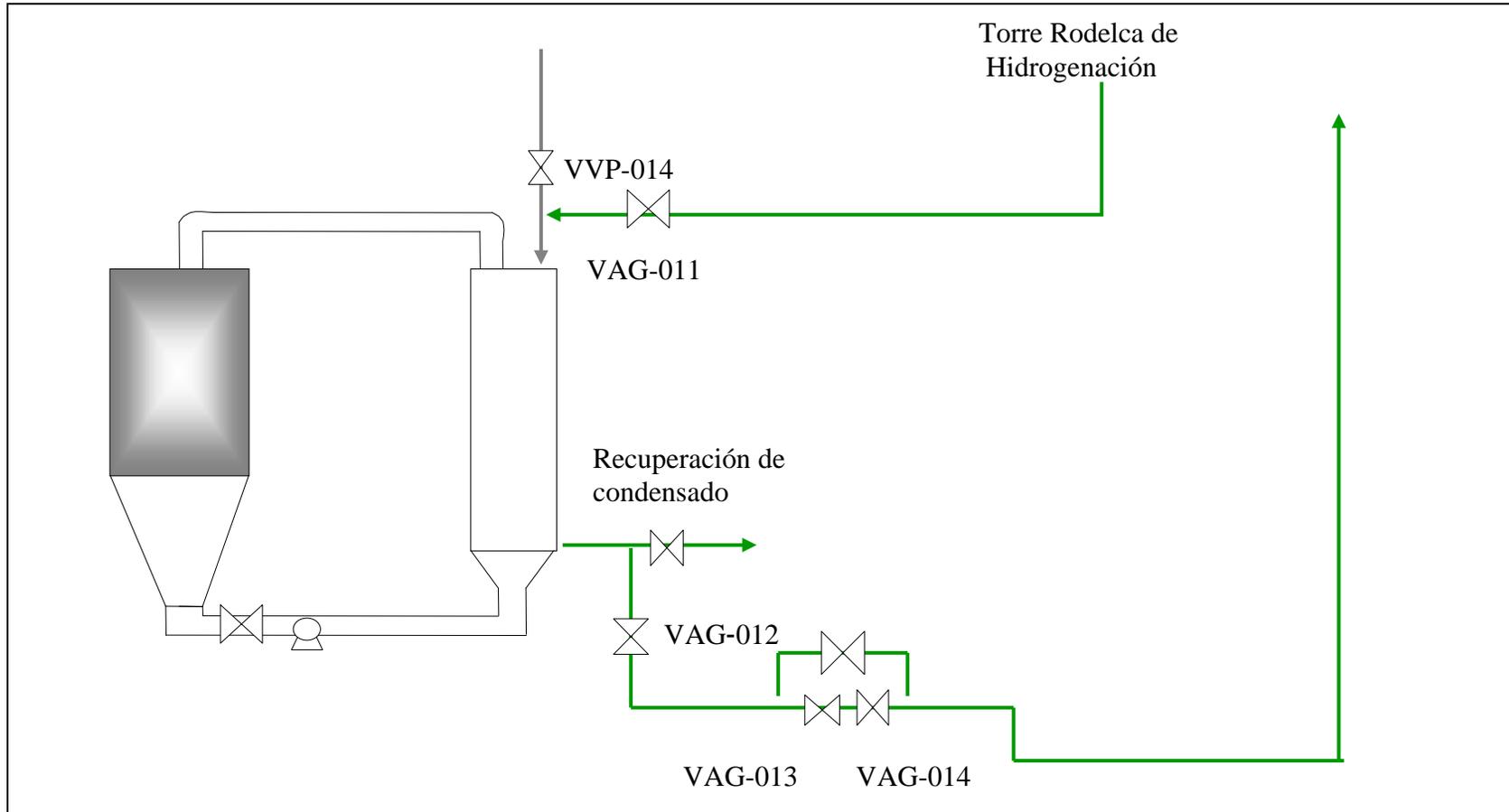


Figura 2.9. Enfriamiento de la carga hidrogenada por el Reactor Buss

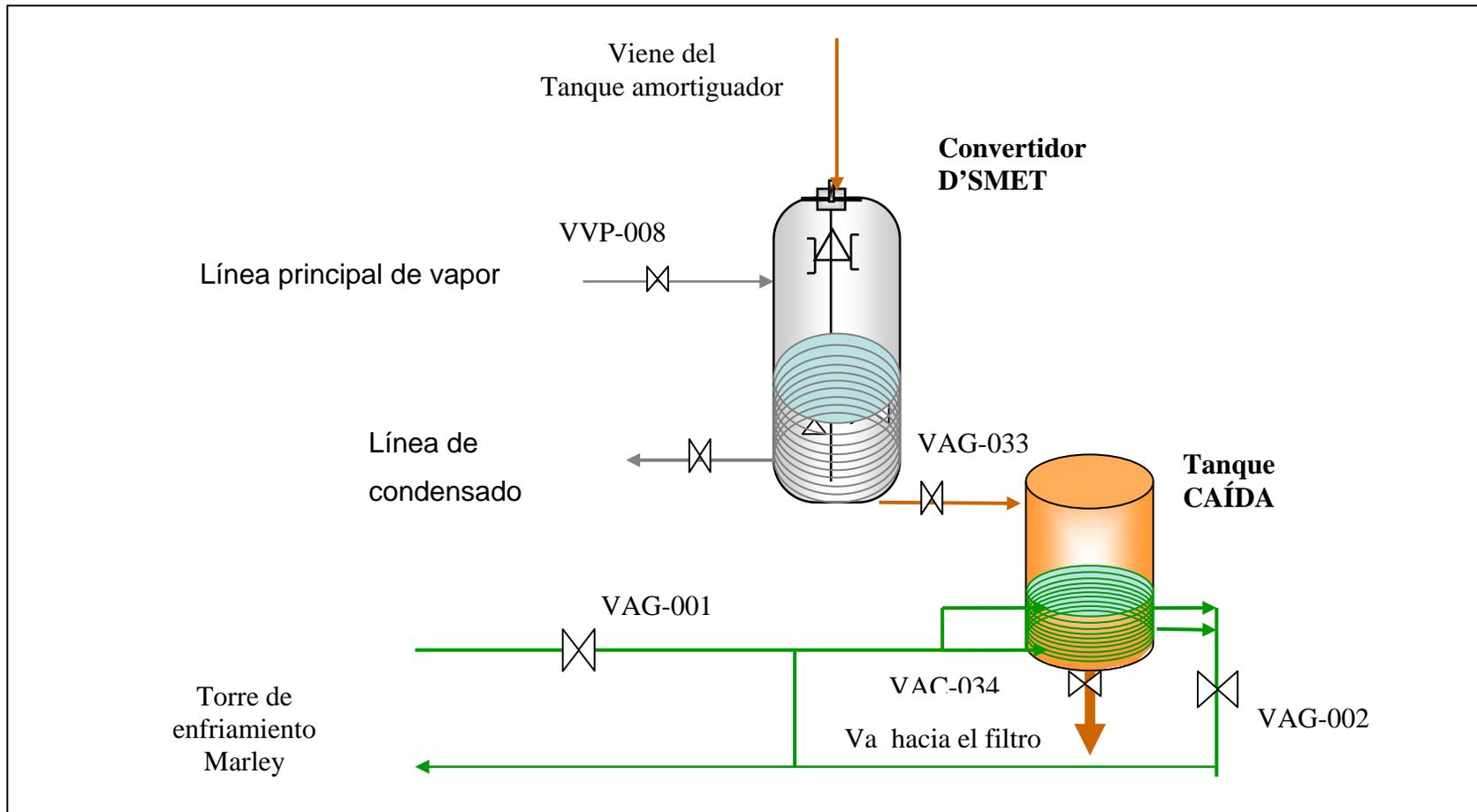


Figura 2.8. Enfriamiento de la carga hidrogenada por el Convertidor D'smet

2.13 - Aplicaciones alimenticias del aceite de palma (Fedepalma, 2006)

a-) **Usos Comestibles:** La palma de aceitera es un cultivo perenne, de tardío y largo rendimiento ya que la vida productiva puede durar más de 50 años. Actualmente, el aceite de palma es el segundo aceite más consumido en el mundo y se emplea como aceite de cocina y para elaborar productos de panadería, pastelería, confitería, heladería, sopas instantáneas, salsas, diversos platos congelados y deshidratados, cremas no lácteas para mezclar con el café.

El contenido de sólidos grasos del aceite de palma le da a algunos productos como margarinas y mantecas una consistencia sólida/semisólida sin necesidad de hidrogenación. En un proceso de hidrogenación parcial se forman ácidos grasos trans, que tienen un efecto negativo en la salud. El aceite de palma es una materia prima que también se utiliza ampliamente en jabones y detergentes, en la elaboración de grasas lubricantes y secadores metálicos, destinados a la producción de pintura, barnices y tintas.

El aceite de palmiste se obtiene de la almendra de la semilla del fruto de la palma. Su composición química es completamente diferente a la del aceite de palma. Tiene ciertas similitudes con el aceite de coco, en cuanto a características y composición. En su estado crudo es ligeramente amarillo, pero una vez refinado es completamente claro lo que le permite ser usado en muchas aplicaciones tanto comestibles como no comestibles.

Dentro de su composición cromatográfica, predomina el ácido graso láurico (C_{12}) que puede estar presente entre un 46% y un 51%, su punto de fusión puede variar entre los 25.9 y los 28°C. Su valor de yodo se encuentra entre los 16.2 a los 19.2 meq /Kg.

El aceite de palmiste es semi-sólido a temperatura ambiente promedio de 25 °C. A bajas temperaturas su contenido de sólidos grasos es alto pero disminuye rápidamente al acercarse a los 30°C. Esta curva de fusión muy pronunciada permite que este aceite sea muy utilizado en aplicaciones para la confitería.

b-) Usos No Comestibles

Aproximadamente un 10% del aceite de palma consumido mundialmente, constituyen aplicaciones no comestibles, siendo su mayor uso en la fabricación de jabón. Tradicionalmente los ingredientes principales para la fabricación de jabón han sido aceite de coco y sebo; sin embargo, con las relaciones de precio y disponibilidad, los productos generados a partir del aceite de palma están siendo cada vez más utilizados que los materiales tradicionales. Su uso se extiende a la industria de los cosméticos, productos de limpieza, fabricación de poliuretanos, gomas y velas, entre otros; como se muestra a continuación:

- ❖ *Productos Oleoquímicos:* Recientes investigaciones han permitido al aceite de palma, llegar a ser la mayor materia prima utilizada en la elaboración de oleoquímicos en aplicaciones como cosméticos, detergentes y otros productos tenso-activos. Actualmente los oleoquímicos producidos a partir del aceite de palma se están empleando en la elaboración de detergentes no contaminantes del medio ambiente debido a que son biodegradables.
- ❖ *Emolientes para cosméticos:* Muchos productos generados a partir de la palma, son ampliamente utilizados como emolientes en formulas de cosméticos (lociones, cremas, aceites de baño, protectores solares y formulaciones de lápiz de labios, entre otros, entre otros).
- ❖ *Plastificantes:* Los plastificantes son normalmente usados en la industria química para dar plasticidad y fuerza a la resina sintética, PVC y plástico. Las ventajas de usar plastificantes generados a partir de la palma son su biodegradabilidad y su carácter no tóxico.
- ❖ *Biodiesel:* Haciendo las modificaciones pertinentes, el aceite de palma puede ser utilizado como sustituto del diesel.

2.14- Catalizadores (Allen, R. 1978)

El catalizador es un elemento crítico de la hidrogenación. Como se sabe, la función del catalizador es la de acelerar la reacción, haciendo que interactúen mas rápidamente las moléculas que se encuentran reaccionando; de esta manera, el catalizador puede influir en la reacción desde el punto de vista de composición, cantidad o porcentaje que se añade en la reacción.

La actividad del catalizador determina cuanto catalizador es necesario para hidrogenar una carga de aceite en un tiempo razonable, y puede definirse como la disminución del valor de yodo por unidad de tiempo durante la hidrogenación. Los catalizadores utilizados en proceso de hidrogenación deben presentar actividades elevadas y tener una larga vida útil, ser consistente de carga a carga, siendo muy selectivo y fácilmente removido por filtración.

El níquel (Ni) proporciona buena estabilidad y es usado casi exclusivamente en todos los procesos de hidrogenación, salvo algunos productos especiales. Otros tipos de catalizadores como el de paladio, cobre-oxido de cromo y otros tipos de aleaciones, pueden ser empleados en condiciones extremas de temperatura y presión, superiores o inferiores a las de níquel; pero siendo poco selectivos y de muy elevado costo.

La cantidad de catalizador que se utiliza en la hidrogenación es muy pequeña, de orden 0,1% de níquel respecto al peso del aceite en el caso de un catalizador puro y de 1-2% para un catalizador usado. Si se aumenta la cantidad de catalizador aumenta la hidrogenación pero el incremento de velocidad no es proporcional a la cantidad de catalizador utilizado. El aumento de la cantidad de catalizador, incrementa la velocidad de la reacción, sin embargo, si se pasa de una cantidad determinada en la concentración, la velocidad permanecerá invariable.

Es sumamente importante saber la cantidad o la concentración de catalizador que se añade ya que si se incrementa demasiado la cantidad del mismo, la concentración de este deja de jugar un papel de factor limitante de a velocidad, pasando a ser otros factores los que limiten la velocidad de la reacción; también provocaría un gasto de material, ya que se estaría usando mas de lo que se necesita.

El tamaño de partícula del catalizador y el tamaño de poros en las partículas son características importantes del catalizador, ya que estas influyen en la actividad y selectividad del

mismo. Según Coenen (1976), para que el catalizador sea fácilmente filtrado del aceite, su tamaño de partícula debe estar en el orden de $0.15\text{m}^2/\text{g}$. Sin embargo, todos los catalizadores tienen partículas porosas con áreas de superficie interiores grandes.

2.14.1- Mecanismos y Reacciones involucradas en la hidrogenación (Kheiri, 1984)

Los mayores cambios químicos en los aceites y grasas generados por la hidrogenación son:

- 1- La saturación de los dobles enlaces en las cadenas del ácido graso insaturado: Hidrogenación.
- 2- El paso de la forma cis a la forma trans de los enlaces insaturados en las cadenas del ácido graso: Isomerización geométrica.
- 3- El cambio de posición de los enlaces insaturado en las cadenas del ácido graso insaturado: Isomerización posicional.
- 4- La formación de sistemas conjugados de enlaces insaturados en cadenas de ácidos grasos poliinsaturados, la cual es un tipo especial de isomerización posicional: Conjugación.

Coenen en 1970, propuso que la hidrogenación de aceites comestibles ocurre necesariamente en un sistema de 3 fases: catalizador sólido, triglicéridos líquidos no volátiles e hidrógeno gaseoso, con una limitada solubilidad en el aceite. La transferencia de masa entre las fases es de vital importancia, ya que determina las concentraciones de los reactantes como el hidrógeno y la oleofina cerca de la superficie del catalizador, y en cambio estas concentraciones gobiernan a velocidad y naturaleza de las reacciones.

Químicamente la hidrogenación de aceites y grasas es una reacción muy simple entre un doble enlace oleofínico e hidrogenado. En ausencia de catalizador, la reacción pasa a través de un complejo activo de energía muy alta, ya que es necesario romper el enlace existente encima de los orbitales tanto como sea posible y hacerlos híbridizar; como se muestra en la figura 2.10. (Allen, 1980).

Con el empleo de un catalizador, la velocidad de reacción aumenta considerablemente. Según Coenen (1976), en primer lugar se forma un complejo metálico intermedio a partir del

doble enlace (a). Luego este complejo reacciona con un átomo de hidrógeno adsorbido en el catalizador para formar un estado medio hidrogenado inestable (b o c), en el que la oleofina se une al catalizador por un solo enlace, permitiéndole girar libremente. Este puede reaccionar con otro átomo de hidrógeno y separarse del catalizador generando un producto saturado (d), o perder un átomo de hidrógeno al catalizador de níquel para restaurar el doble enlace.

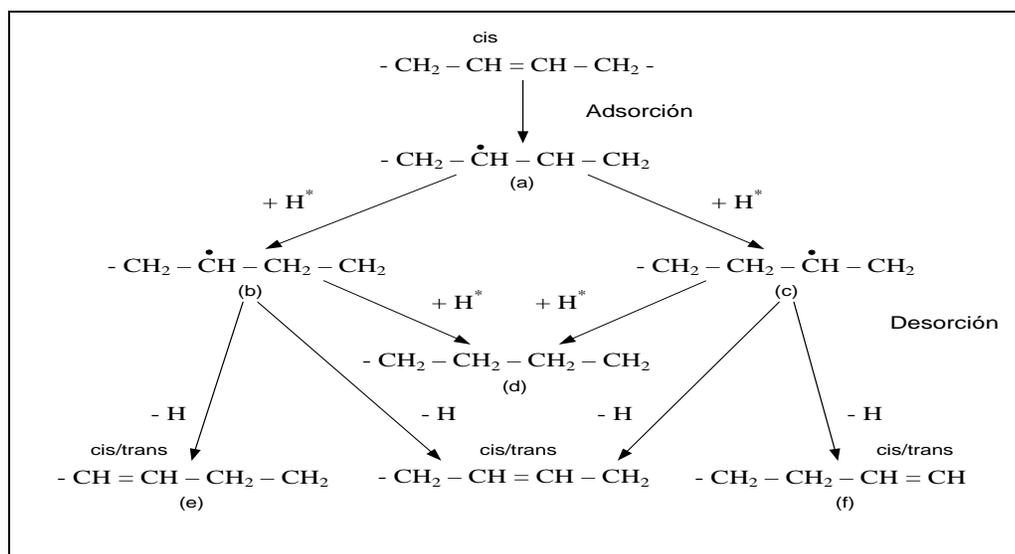


Figura 2.10. Mecanismo de reacción de la hidrogenación en presencia de catalizador.

Este doble enlace regenerado puede encontrarse en la misma posición que el compuesto no hidrogenado o en un isómero posicional y/o geométrico del doble enlace original (e,f) (Ver figura 2.11)

Reacciones comprendidas en la hidrogenación:

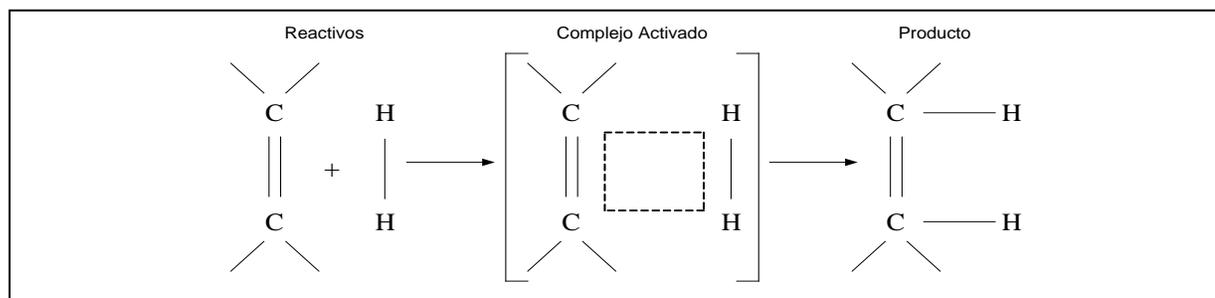


Figura 2.11. Reacción típica de hidrogenación en ausencia de catalizador.

La hidrogenación consiste en una serie de reacciones consecutivas con una cinética de reacción de pseudo primer orden. Según la ley de Arrhenius, la proporción constante k es muy pequeña, lo que indica que la reacción es infinitamente lenta. Una versión simplificada del sistema de reacciones envueltas en la hidrogenación de un triglicérido mixto de ácidos grasos insaturados se observa en la figura 2.12; donde K_3 , K_2 y K_1 son las constantes de velocidad de reacción de los ácidos linolénico y oleico respectivamente.

De acuerdo a esta versión el ácido linolénico es el primer en ser hidrogenado para producir ácidos C18:2. Luego estos son hidrogenados a ácidos C18:1 que son finalmente hidrogenados en ácidos esteáricos.

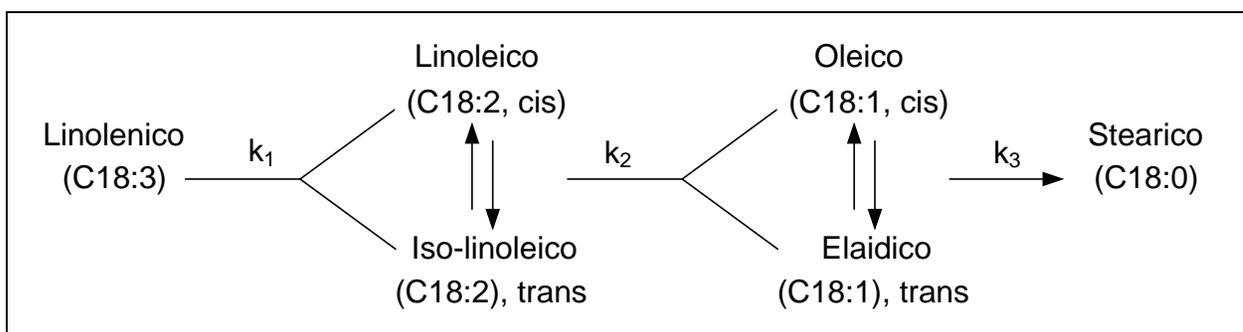


Figura 2.12. Sistema de reacciones envueltas en la hidrogenación de un triglicérido.

2.14.2- Factores que afectan la funcionalidad del Catalizador (Allen, R. 1978)

Los catalizadores de hidrogenación se caracterizan por su extraordinaria afinidad hacia las trazas de jabón y otras impurezas, que se encuentran en todos los aceites. La absorción de estas impurezas sobre la superficie del catalizador, tienen un efecto envenenador sobre el mismo; perdiendo su capacidad de para actuar catalíticamente. Se pueden resumir las impurezas que afectan la actividad del catalizador, en los siguientes reglones:

- ❖ Venenos del catalizador (Agua, ácidos grasos libres, hidroperóxidos, azufre y halógenos)
- ❖ Inhibidores del catalizador (fosfátidos y jabones álcali)
- ❖ Desactivadores del catalizador (Agua, y ácidos grasos libres)

Si las impurezas son retenidas por los átomos activos del catalizador, llegara el momento en que se concentren sobre la superficie del mismo, volviéndolo inactivo. Un gran número de diferentes compuestos tienen la capacidad de envenenar el catalizador usado, y ellos son a menudo, la principal fuente de problemas durante los procesos comerciales de hidrogenación.

Después de la hidrogenación, el catalizador debe separarse de la grasa endurecida por filtración quedando un aceite claro. Los catalizadores pueden reutilizarse un gran número de veces. La eliminación incompleta de níquel es muy criticable desde el punto de vista nutricional y además, da al aceite un color verde grisáceo, visualmente no aceptable.

2.14.3- Generalidades de los efectos del Níquel sobre el ambiente y la salud. (Sociedad Watchtower, 2008 y Villada., 2008)

El níquel es liberado al aire por las plantas de energía y las incineradoras de basuras. Este se depositará en el suelo o caerá después de reaccionar con las gotas de lluvia. Usualmente lleva un largo periodo de tiempo para que el níquel sea eliminado del aire. El níquel puede también terminar en la superficie del agua cuando es parte de las aguas residuales. La mayor parte de todos los compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorberán por los sedimentos o partículas del suelo y llegará a inmovilizarse. En suelos ácidos, el níquel se une para llegar a ser más móvil y a menudo alcanza el agua subterránea.

No hay mucha más información disponible sobre los efectos del níquel sobre los organismos y los humanos. Sabemos que altas concentraciones de níquel en suelos arenosos puede claramente dañar a las plantas y altas concentraciones de níquel en aguas superficiales puede disminuir el rango de crecimiento de las algas. Microorganismos pueden también sufrir una disminución del crecimiento debido a la presencia de níquel, pero ellos usualmente desarrollan resistencia al níquel. Para los animales el níquel, es un elemento esencial en pequeñas cantidades. Pero el níquel no es sólo favorable como elemento esencial; puede ser también peligroso cuando se excede la máxima cantidad tolerable. Esto puede causar varios tipos de cánceres en diferentes lugares de los cuerpos de los animales, mayormente en aquellos que viven cerca de refinerías. No es conocido que el níquel se acumule en plantas o animales. Como resultado el níquel no se biomagnifica en la cadena alimentaria.

Por otra parte, es importante que la utilización del Níquel en el proceso de hidrogenación, no contribuya con el calentamiento global, ya que este último ha sido calificado como la mayor amenaza de la humanidad, este problema se agiganta día a día y expertos afirman que este problema se debe a la acción del hombre, debido al crecimiento de la población y al consumo de energía en el mundo, que sigue impactando, dado que el petróleo y el carbón producen gases de efecto invernadero al arder, generando contaminación ambiental. Es por ello que se deben tomar medidas para disminuir el consumo energético y contribuir para lograr la mejora del medio ambiente.

2.15- Control de procesos

Para lograr un control en el proceso de hidrogenación es necesario realizar una serie de análisis al aceite, de los cuales se describen a continuación:

2.15.1- Determinación de la acidez (Herrera., 2001)

Este análisis determina el contenido de ácidos grasos libres de un aceite o grasa vegetal, expresada en gramos de ácido oleico, palmítico o láurico, por 100 gramos de muestra.

El índice de acidez es una medida del grado de descomposición del aceite o de la grasa, por la acción de las lipasas o por alguna otra causa. La descomposición se acelera por la luz y el calor. Como la rancidez se acompaña, usualmente, por la formación de ácidos grasos libres, la determinación es usada, con frecuencia, como una indicación general de la condición y comestibilidad de los aceites y grasas.

El principio de este análisis es de neutralizar los ácidos grasos libres en una porción determinada de muestra, con una solución valorada de álcali.

2.15.2- Índice de yodo (Herrera., 2001)

Se determina el índice de yodo del aceite por el método de Wijs, el cual es una medida de la insaturación de las grasas y aceites y se expresan en términos del número de gramos de yodo absorbidos por 100 gramos de muestra.

La determinación de yodo en aceites o grasas que contienen enlaces dobles, se basa en la absorción del halógeno según ciertas condiciones, para provocar resultados estequiométricos. Los resultados se emplean en términos de yodo (cg de yodo/ g de aceite o grasa).

2.15.3- Índice de refracción (Herrera., 2001)

Se determina el índice de refracción del aceite, que tiene como definición la relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo refracción de un rayo luminoso, que pasa del aire al aceite o grasa, a una temperatura constante.

El índice de refracción puede ser obtenido en algún tipo de refractómetro, por ejemplo el de Abbé, Butyro o cualquier otro equipo con escala normalizada. Su temperatura deber ser controlada dentro de un rango de $\pm 0,1$ °C mediante un baño controlado térmicamente. Las grasas se leen en el refractómetro en un baño de 60°C, ya que la mayoría de las grasas son líquidas a esa temperatura.

2.15.4- Determinación de color (Kheiri., 1984)

Tiene como método combinar filtros de color, hasta lograr el color que mas se asemeja a la muestra problema. Para esto se utiliza un colorímetro de Lovibond, utilizando una celda adecuada; este método determina el color por comparación entre el color de la luz transmitida a través de un determinado espesor de grasa o aceite líquido (normalmente $5 \frac{1}{4}$ pulgadas) y el color de la luz originada por la misma fuente, transmitida a través de vidrios coloreados estándar.

2.15.5- Punto de fusión (Kheiri., 1984)

En los triglicéridos relativamente puros, muy raramente es posible hablar de un verdadero punto de fusión; ya que normalmente este se encuentra en un rango amplio. Dependiendo de las condiciones de hidrogenación, una muestra hidrogenada con un mismo índice de yodo puede tener diferentes puntos de fusión.

Sin embargo, a condiciones dadas de hidrogenación, el punto de fusión constituye una medida del grado de saturación del aceite y es buen parámetro para controlar la consistencia y la calidad del producto final y para determinar el final de la hidrogenación; ya que la saturación causa un aumento en el punto de fusión y en las características del fundido.

2.15.6- Contenido de grasas sólidas (Kheiri., 1984)

La determinación del contenido de grasa sólida en aceites crudos y refinados constituye un parámetro de calidad para verificar las características de las materias primas, de los procesos y de los productos industriales. El índice de grasa sólida es un buen indicador del rango plástico de una grasa o mezcla de grasas, es decir, la firmeza de un aceite o margarina a una temperatura determinada y su licuefacción a la temperatura de la boca.

A una temperatura dada la consistencia de la grasa, depende de la cantidad de grasa sólida presente a esa temperatura. Tanto el grado de hidrogenación como el de isomerización son asociados con el incremento del contenido de grasa sólida de la muestra a una temperatura dada. El contenido o el índice de grasa sólida de la muestra es determinado a las temperaturas apropiadas por resonancia magnética nuclear (RNM) o dilatometría. El índice de grasa sólida determinado por dilatometría, se ha convertido en el método utilizado con mayor frecuencia para juzgar la consistencia de las grasas hidrogenadas.

2.16- Flujos monetarios (Tarragó., 1986)

Para el análisis económico, se deben estudiar aspectos como inversión inicial, costos operacionales e impuestos sobre la renta, ya que estos nos determina la viabilidad económica al realizar un proyecto.

2.16.1- Inversión inicial: La inversión inicial consiste en la aplicación de recursos financieros a la creación, renovación, ampliación o mejora de la capacidad operativa de la empresa. Esta se determina como la suma del capital fijo total y el capital de trabajo.

Capital fijo: comprende una porción de la inversión inicial destinada a la compra de los activos fijos tangibles y los activos fijos intangibles.

Capital de trabajo: es la cantidad de dinero necesaria para cubrir los fondos de capital indispensables para que el proyecto inicie sus operaciones hasta que se produzcan los primeros ingresos.

2.16.2- Costos operacionales: Incluyen todos los desembolsos que se requieren para que una vez iniciado el proceso productivo continúe operando normalmente. Se calcula como la sumatoria de los costos de manufactura y gastos generales.

Costos de manufactura: son los costos involucrados en operación de plantas y sistemas de distribución, inclusive servicios directos de apoyo.

Gastos generales: son los costos involucrados en actividades periféricas, necesarios para la supervivencia de actividad productiva.

2.16.3- Impuestos sobre la renta: Impuesto sobre la renta es la remuneración que percibe el estado por parte de personas naturales o empresas por ejecutar actividad productiva y lograr enriquecimiento. La tasa y el sustraendo dependen de la unidad tributaria de la empresa.

1. El aceite de palma utilizada como materia prima en el proceso cumple con las especificaciones de calidad internas y las normativas internacionales.
2. El sistema D'smet es más efectivo que el sistema Buss, ya que es capaz de obtener más cargas hidrogenadas dentro de especificaciones para una base 42.
3. Los tiempos de procesamiento de una carga tanto por el sistema Buss y el D'smet resultan elevados, lo que afecta la capacidad de producción estipulada.
4. Actualmente se puede obtener 3 cargas hidrogenadas en un lapso de 24 horas, tanto para el sistema Buss como el D'smet.
5. Las etapas que generan mayor retraso en el proceso son el calentamiento, la hidrogenación y la filtración para ambos sistemas.
6. El aceite de palma cruda se encuentra libre de ácidos grasos trans.
7. La formación de grasas trans aumentan con la hidrogenación catalítica, incrementándose en mayor porcentaje en el sistema D'smet.
9. El aumento de temperatura y los tiempos prolongados de exposición a ésta, durante la reacción de hidrogenación, favorece la formación de grasos trans.
10. Las alternativas seleccionadas para mejorar el proceso de hidrogenación, son: la implementación de un cuantificador de hidrógeno tipo V Cone y un sistema de control de temperatura automatizado.

Recomendaciones:

1. Asegurar el paso del aceite por los intercambiadores de calor que se encuentran previos a la hidrogenación, mediante verificaciones continuas en esta etapa del proceso, y de esta

manera se disminuirán los tiempos del proceso de hidrogenación de una carga, tomando en cuenta que el calentamiento es una de las etapas que genera mayor retraso.

2. Llevar a cabo los análisis periódicos necesarios para determinar la calidad o pureza del hidrógeno, ya que no se tiene conocimiento de esto, sabiendo que influye directamente en la reacción de hidrogenación.
3. Diseñar e implementar una planta de Interestificación Enzimática, con la finalidad de aumentar la calidad del producto final, ya que no hay formación de sub-productos ni de isómeros trans. Además es un proceso más simple; ya que posee menos operaciones unitarias, no hay necesidad de un post blanqueo ni se usan productos químicos. Es importante recalcar que la inversión del capital es baja, ya que solo se requieren reactores simples y los costos variables totales son competitivos con procesos alternativos.

1. Ajzenberg, N. (2002). Introducción a la hidrogenación de aceite y su implementación en un proceso supercrítico: caso del aceite de girasol. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Química. Rev. Grasas y Aceites. 53, p 229-238.
2. Allen, R.R (1978). Principles and catalysts for hydrogenation of and oils. Paper presented at AOCS short course on processing and quality control of fats and oils, Michigan State University, East Lasing, M.I. U.S.A.
3. Becerra, J. (2007). Interesterificación enzimática de aceites y grasas. Asociación Nacional de Industriales de Aceite y Mantecas Comestibles, A.C. México. Disponible: http://portal.aniname.com/articulo_58.shtml. [Consulta: 2008, Septiembre 07].
4. Calvo, M. (2004). Principales grasas comestibles. Bioquímica de los alimentos. Universidad de Zaragoza. España. [Consulta: 2008, julio 15]. Disponible: <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/lipidos/vegcomunes.html>.
5. Cottrel, R. (1991). Nutritional aspect of palm oil. American Journal of Clinical Nutrition. Estados Unidos. V.53, p.889s-1009s.
6. Fedepalma. (2008). La palma de aceite. Bogota, Colombia. Disponible en: <http://www.fedepalma.org/body/palb.htm>. [consulta: 2008, Septiembre 13].
7. Gioielli, L. (2001). Hidrogenación e interesterificación del aceite de castaña de Brasil. Universidad de Sao Paulo. Facultad de Ciencias Farmacéuticas. Departamento de Tecnología Bioquímica- Farmacéutica. Rev. Grasas y Aceites. 52, p 192-197.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8. Giugni, L. (1997). Evaluación de proyectos de inversión. Universidad de Carabobo. Venezuela.
9. Griguol, V; Leon, M; Vicario, I. (2005). Contenido en ácidos grasos trans de las margarinas: Evolución en las últimas décadas y tendencias actuales. Revista ALAN, Número 4, Volumen 55, (Pág. 367-374). Caracas.
10. Herrera, C. (2001). Química de alimentos. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. (Pág. 27-32).
11. Jacobsberg, B. Quality of Palm Oil. Palm Oil Research Institute of Malaysia. Porim Technology. October, (1983). Number 10.
12. Kritchevsky D. (1995). Fatty acids, triglyceride structure and lipid metabolism. Journal of Nutrition Biochemistry. V.6, Pág. 172-178.
13. Martínez, O; Sánchez, F y Suárez, O. (2007). Producción de ésteres etílicos a partir de aceite de palma RBD [Revista en línea]. Universidad Nacional de Colombia. Disponible: <http://www.scielo.org.co/scielo.php>. [Consulta: 2007, Diciembre 15].
14. Mazzani, B. (1992). Estado actual y perspectivas del cultivo de especies oleaginosas en Venezuela y en los otros países amazónicos [documento en línea] Disponible:http://www.redpav-fpolar.info.ve/fagro/v18_34/v1839010.html [consulta:2004,octubre19].
15. M.S.A. Kheiri. Hydrogenation. Palm Oil Research Institute of Malaysia. Porim technology. (1984). Number 10.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

16. Método oficial A.O.C.S, (1989): Determinación del índice de fósforo. N° Ca 12-55.
17. Método oficial A.O.C.S, (1993): Determinación del índice de grasa sólida. N° Cd 10-57.
18. Método oficial A.O.C.S, (1993): Determinación de isómeros cis y trans. N° Ce 1c-89.
19. Normas COVENIN, (1996): Aceites y grasas vegetales. Determinación del color. N° 1191-88. Venezuela.
20. Normas COVENIN, (2001): Aceites y grasas vegetales. Determinación de la acidez. N° 325-1996. Venezuela.
21. Normas COVENIN, (2001): Aceites y grasas vegetales. Determinación del índice de refracción. N° 702-1996. Venezuela.
22. Normas COVENIN, (2001): Aceites y grasas vegetales. Determinación del índice de yodo por el método de wijs. N° 324-1996. Venezuela.
23. Paredes, L. (2003). Estudio de catalizadores del sistema Ni-Cu soportado en arcilla y alumina en la reacción de hidrogenación del aceite de girasol [Resumen en línea]. Trabajo de grado publicado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. Perú. Disponible: http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Tesis/Ingenie/Paredes_M_L/cap7.htm. [consulta: 2008, Marzo 13].
24. Ramírez, A. (2007). Hidrogenación catalítica del aceite de palma con sistemas bimetalicos tipo cu-ni soportados en zno. [Revista en línea]. Universidad de Cauca. Colombia. Disponible:<http://www.unicauca.edu.co/biotecnologia/ediciones/vol5/5Vol5.pdf>. [Consulta: 2007, Diciembre 15].



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

25. Rojas, L. (2001). Herramientas para el mejoramiento de calidad. Diagrama causa-efecto y pareto. CEATE. Venezuela, Pág. 19 y 22.
26. Sociedad Watchtower. (2008). El Calentamiento Global ¿Peligra el planeta tierra?. Nueva York. V.89, Pág. 3-7.
27. Tarrágo, F. (1986). Fundamentos de economía de la empresa. Pág. 308.
28. Uauy, R. (2008). Las amélicas libres de grasas trans. Washington, D.C. Disponible en: http://www.fundacionbengoa.org/noticias/grasas_trans.asp. [Consulta: 2008, Agosto 15].
29. Villada, J. (2008). Calentamiento global y cambio climático. México. Disponible en: <http://www.edomex.gob.mx/medioambiente/pasar/calentamiento>. [Consulta: 2008, Agosto 15].