



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“PROPUESTA DE UN PLAN DE ACCIÓN PARA LA
PREVENCIÓN DE LA POLIMERIZACIÓN EN LA
PRODUCCIÓN DE ACEITES COMESTIBLES”**

“TESINA”

**Tesina presentada para obtener el grado de:
Licenciatura en Ingeniería Química**

Presenta:

ALEJANDRO LEDESMA MARTIN

Director de Tesina:

DRA. JUANA DEISY SANTAMARÍA JUÁREZ

Asesores de Tesina:

DR. GUILLERMO SANTAMARÍA JUÁREZ

**M.A. MARÍA MARGARITA VICTORIA ROMANO
RODRÍGUEZ**

Puebla, Pue., septiembre 2025

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN.....	3
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
HIPÓTESIS	5
CAPÍTULO I.....	6
MARCO TEÓRICO	6
1.1 <i>Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF)</i>	6
1.2 <i>Diagrama de Ishikawa</i>	9
1.3 <i>Diagrama de Pareto</i>	10
1.4 <i>Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP)</i>	11
1.5 <i>Proceso de producción de aceites comestibles en México</i>	14
CAPÍTULO II.....	20
METODOLOGÍA	20
2.1 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DE MEJORA	20
2.2 DESARROLLO DEL DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ACTUAL Y ÁREAS DE MEJORA EN CALIDAD Y SEGURIDAD	22
2.3 ANÁLISIS DE PELIGROS Y PUNTOS CRÍTICOS DE CONTROL (HACCP)	22
2.4 DIAGRAMA DE ISHIKAWA	29
2.5 DIAGRAMA DE PARETO.....	32
2.6 ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (AMEF)	36
2.7 DESCRIPCIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN.	41
CAPÍTULO III.....	44
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
3.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS HACCP.....	44
3.2 RESULTADOS DEL DIAGRAMA DE ISHIKAWA	45
3.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PARETO.....	46
3.4 RESULTADOS DEL AMEF	47
3.5 DISCUSIÓN FINAL.....	47
CONCLUSIONES.....	49
RECOMENDACIONES.....	56
REFERENCIAS.....	51
ANEXO A.....	53
ANEXO B	54
ANEXO C	55

ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Página</i>
Fig. 1. <i>Fragmento del formato AMEF</i>	8
Fig. 2. <i>Formato del diagrama de Ishikawa</i>	10
Fig. 3. <i>Ejemplo de un diagrama de Pareto</i>	11
Fig. 4. <i>Formato de plan HACCP para el control de peligros en la polimerización de aceites comestibles</i>	13
Fig. 5. <i>Diagrama de flujo del proceso de polimerización de aceite comestible</i>	21
Fig. 6. <i>Diagrama de Ishikawa para identificar causas de problemas en calidad y seguridad en la polimerización de aceites</i>	30
Fig. 7. <i>Diagrama de Pareto para el proceso de polimerización del aceite comestible en México</i>	35

ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Página</i>
Tabla 1. <i>Plan HACCP para el proceso de polimerización de aceite comestible</i>	27
Tabla 2. <i>Frecuencia de fallas y su impacto en el proceso de polimerización de aceites comestibles</i>	33
Tabla 3. <i>Porcentaje de contribución e impacto acumulado en el proceso de polimerización de aceites comestibles</i>	34
Tabla 4. <i>Tabla de criterios para la severidad, ocurrencia y exposición para el método AMEF</i>	38
Tabla 5. <i>AMEF para el proceso de polimerización de aceites comestibles</i>	39
Tabla 6. <i>Plan de acción para el proceso de polimerización de aceite comestible en México</i>	42

INTRODUCCIÓN

La industria de los aceites comestibles desempeña un papel clave en el sector alimentario nacional, tanto por su alto volumen de producción como por su impacto directo en la salud de los consumidores. Bajo este contexto, asegurar la calidad del producto no es solo una exigencia técnica, sino también una responsabilidad social y económica de quien lo produce. A lo largo de los distintos procesos industriales a los que se somete el aceite, desde la selección del aceite crudo hasta su refinamiento y almacenamiento, el producto queda expuesto a condiciones que podrían comprometer su estabilidad química y, en consecuencia, su funcionalidad y valor nutricional.

Durante la revisión de bibliografía y de experiencias reportadas en esta industria se identificó un aspecto poco atendido pero de gran relevancia: la polimerización no deseada. Este fenómeno ocurre cuando los ácidos grasos se enlazan entre sí bajo condiciones de calor o presencia de ciertos compuestos, lo que genera un aumento en la viscosidad y cambios en la textura del aceite. Dichas alteraciones repercuten en la forma en que el producto se comporta durante su uso y, por consecuencia, en su calidad final.

A diferencia de sectores como el de los plásticos o resinas, donde la polimerización es intencionada con el fin de obtener materiales con propiedades específicas; en los aceites destinados al consumo humano representa un fallo que compromete tanto su valor nutricional como su aceptación comercial. Reconocer esa diferencia fue el punto de partida de este trabajo.

Este trabajo plantea un enfoque basado en la aplicación de herramientas de análisis de riesgos y control de calidad, como HACCP, Ishikawa, AMEF y Pareto, a lo largo de seis etapas clave del proceso de producción de aceites comestibles. Estas herramientas permitirán establecer controles preventivos y tomar decisiones informadas sobre dónde actuar y cómo evitar que el aceite se deteriore de forma prematura.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo del proceso de producción de aceites comestibles, existen múltiples factores que pueden afectar su calidad, desde la composición de la materia prima hasta el control de variables operativas como la temperatura, la humedad o la exposición al oxígeno. Aunque muchas plantas cuentan con procedimientos técnicos estandarizados, no siempre existe una visión preventiva clara que permita anticipar fallos que comprometan la estabilidad del aceite.

Uno de los fenómenos más problemáticos es la polimerización no deseada. Este proceso, que puede presentarse cuando el aceite es sometido a condiciones térmicas inadecuadas o se encuentra en contacto con impurezas catalíticas, genera la formación de polímeros que alteran por completo las propiedades del producto: se incrementa la viscosidad, cambia el color, se reduce su estabilidad y, en muchos casos, pierde su funcionalidad para el consumidor final.

En la revisión literaria, quedó claro que la polimerización suele analizarse desde la química o la ingeniería de materiales, pero rara vez se estudia como problema en la elaboración de aceites comestibles; y mucho menos se aborda desde un enfoque que combine la calidad del producto con la seguridad alimentaria y la inocuidad. Esa falta de integración tiene consecuencias prácticas: lotes que no cumplen especificaciones, reprocesos que elevan costos y un efecto directo en cómo el consumidor percibe el aceite en el mercado.

En este escenario, el presente proyecto se plantea como una propuesta con sentido preventivo. Su propósito es identificar oportunamente las condiciones que favorecen la polimerización, intervenir con herramientas de análisis estructurado y asegurar que el aceite conserve sus propiedades físicas, químicas y nutricionales hasta el momento de consumo.

JUSTIFICACIÓN

La calidad de los aceites comestibles es un aspecto fundamental en la industria alimentaria, no solo por sus implicaciones en la funcionalidad del producto, sino también por su impacto directo en la salud del consumidor. Dentro de los diversos factores que pueden llegar a comprometer su calidad, la polimerización no deseada representa un riesgo significativo, especialmente cuando esta ocurre de manera silenciosa durante etapas críticas del proceso, sin que exista un sistema preventivo que permita anticiparla o corregirla a tiempo.

En la revisión de literatura y experiencias en su producción, se logró detectar que gran parte de los enfoques actuales sobre la polimerización están dirigidos a procesos donde esta transformación es intencionada y deseada, como en la obtención de aceites con propiedades técnicas especiales. Sin embargo, este enfoque no resulta aplicable ni útil para contextos donde la polimerización actúa como una forma de deterioro, como es el caso de los aceites destinados al consumo humano. Esta diferencia de enfoques hace necesario un tratamiento específico, orientado a identificar las causas que propician la polimerización no deseada y a establecer medidas que puedan aplicarse desde el inicio del proceso para reducir el riesgo de manera efectiva. Además, es importante considerar que muchas plantas productoras, en especial aquellas PYMES en México, que no cuentan con sistemas de gestión integrados que les permitan observar el proceso desde una perspectiva preventiva ([Guirette et al., 2021](#)). La aplicación de metodologías como HACCP, AMEF, Pareto y el diagrama de Ishikawa representa una alternativa práctica para anticipar estos fallos, priorizar riesgos y decidir dónde actuar antes de que los defectos se materialicen.

Este trabajo entonces busca brindar una propuesta práctica, realista y aplicable que permita anticiparse a uno de los problemas más complejos en la producción de aceites, y que, de ser ignorado, puede derivar en pérdidas económicas, rechazo de producto, disminución en la confianza del consumidor y afectaciones a la salud pública.

OBJETIVO GENERAL

Proponer un plan de acción basado en herramientas de análisis de calidad y riesgo (HACCP, AMEF, diagrama de Ishikawa y diagrama de Pareto), que permita prevenir la polimerización no deseada en la producción de aceites comestibles, a través de la identificación de puntos críticos y la implementación de controles en seis etapas clave del proceso.

Objetivos específicos

- Describir el proceso general de producción de aceites comestibles en México, identificando las etapas con mayor susceptibilidad a fenómenos de degradación, en particular la polimerización.
- Analizar las principales causas que favorecen la polimerización no deseada en el aceite, considerando variables como temperatura, presión, humedad, tiempo de exposición y presencia de impurezas.
- Aplicar el Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP) para detectar riesgos asociados a cada etapa del proceso y proponer medidas preventivas orientadas a mantener la estabilidad del aceite.
- Emplear el diagrama de Ishikawa y el AMEF para identificar y priorizar causas raíz que puedan generar condiciones favorables a la polimerización durante el procesamiento del aceite.
- Utilizar el diagrama de Pareto para clasificar y jerarquizar los factores que tienen mayor impacto en la calidad del producto final, con base en los datos obtenidos en el análisis previo.
- Diseñar un plan de acción estructurado que integre los hallazgos de todas las herramientas utilizadas, proponiendo acciones correctivas y preventivas específicas para cada etapa crítica del proceso.

HIPÓTESIS

Se plantea que la aplicación teórica de un plan de acción sustentado en herramientas de análisis de riesgos y calidad, específicamente la metodología HACCP, AMEF, diagrama de Ishikawa y diagrama de Pareto, de manera estructurada en las etapas críticas del proceso de producción de aceites comestibles, permitirá reducir significativamente la probabilidad de que ocurra polimerización no deseada. Con ello se espera mantener la estabilidad del producto y disminuir los fallos que afectan su calidad final.

CAPITULO I

Marco teórico

1.1 Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF)

El AMEF tiene su origen en la década de 1950, cuando este surge primeramente en contextos militares dentro de los Estados Unidos y por su gran utilidad, poco tiempo después, fue adoptado por la NASA como un recurso para incrementar la fiabilidad de sistemas críticos. En estas primeras aplicaciones se utilizaban procedimientos muy formales, conocidos en algunos documentos como “procedimiento para la ejecución de un modo de falla, efectos y análisis de criticidad”. El propósito en estas primeras etapas era detectar y prevenir fallos que pudieran comprometer la seguridad de las misiones y de las personas involucradas. Con el paso del tiempo, especialmente durante las misiones Apolo y en décadas posteriores, la técnica comenzó a trasladarse a otros ámbitos industriales. Un ejemplo de esto se dio en la industria automotriz cuando en 1980 la empresa Ford utilizó el AMEF para evaluar riesgos en diseños como en los tanques de combustible y así lograr prevenir incidentes que tuvieran un gran impacto.

Su difusión también se vio impulsada por el desarrollo normativo y la estandarización; la publicación de las normas ISO 9000 en 1988 fomentó la incorporación de metodologías de prevención en los sistemas de gestión de la calidad. A inicios de los años noventa, fabricantes como Chrysler, Ford y General Motors impulsaron su adopción como requisito de calidad dentro de la cadena de suministro. Desde entonces, el AMEF se ha convertido en una herramienta común en distintos sectores a nivel mundial (Izar, 2018, p. 127).

Pasando a su definición operativa, el AMEF se describe como una técnica de carácter inductivo que permite analizar la seguridad y la fiabilidad de un sistema. Su objetivo es estudiar los modos de fallo potenciales, identificar sus causas y valorar los efectos que estos generan sobre el proceso o producto. Bajo este contexto, se define por “fallo” la situación

en la que un componente o sistema no cumple con lo que estaba especificado; mientras que el “modo de fallo”, describe la manera en que se manifiesta dicho incumplimiento y puede clasificarse en categorías como fatiga, corrosión, fuga o desgaste, entre otras ([Asociación de la Industria Navarra, 1991, pp. 45–46](#)).

En la **Figura 1** se muestra un fragmento del formato AMEF utilizado en el diplomado de Sistemas de Gestión Integrados de la Facultad de Ingeniería Química (Módulo 3); el formato completo aparece en el Anexo B.

No. ACTIVIDAD	RUTINARIO	NO RUTINARIO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN PELIGRO	PSICOSOCIAL	J	Q	F	B	M	E	Capacidad	T	P	what if? (falla)	ACTOS INSEGUROS	FACTORES PERSONALES	FACTORES DE LA EMPRESA	RIESGOS ASOCIADOS (consecuencias)
												V/M/Q	°C	K/cm2					

Figura 1. Fragmento del formato AMEF proporcionado en el Módulo 3 del Diplomado de Sistemas de Gestión Integrados. (BUAP, 2024)

1.2 Diagrama de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de espina de pescado y diagrama causa-efecto, es un esquema que muestra las posibles causas clasificadas de un problema.

Es utilizado para la identificación de las causas más probables que presenten problemas repetitivos, este diagrama consta de una línea principal (horizontal) que tiene en la punta derecha el problema a analizar, además de 6 líneas colocadas a 45° que parten 3 hacia arriba y 3 hacia abajo, estas líneas representan los factores que intervienen en cualquier proceso de fabricación y son llamados 6 Ms ([Escalante, 2006](#)). Ver **figura 2**.

De acuerdo con [San Miguel \(2007\)](#) en su libro Calidad, comenta que estas son las causas más comunes que pueden ocasionar variaciones en los procesos, y son las enlistadas a continuación:

- Variaciones en las **M**áquina o equipos.
- Variaciones en el **M**aterial de entrada al proceso.
- Variaciones en el **M**étodo o procedimiento.
- Variaciones en los operarios o **M**ano de obra (Capital humano).
- Variaciones en el **M**edio ambiente.
- Variaciones en las **M**edidas.

En la **Figura 2**, se presenta el formato básico de un diagrama de Ishikawa.

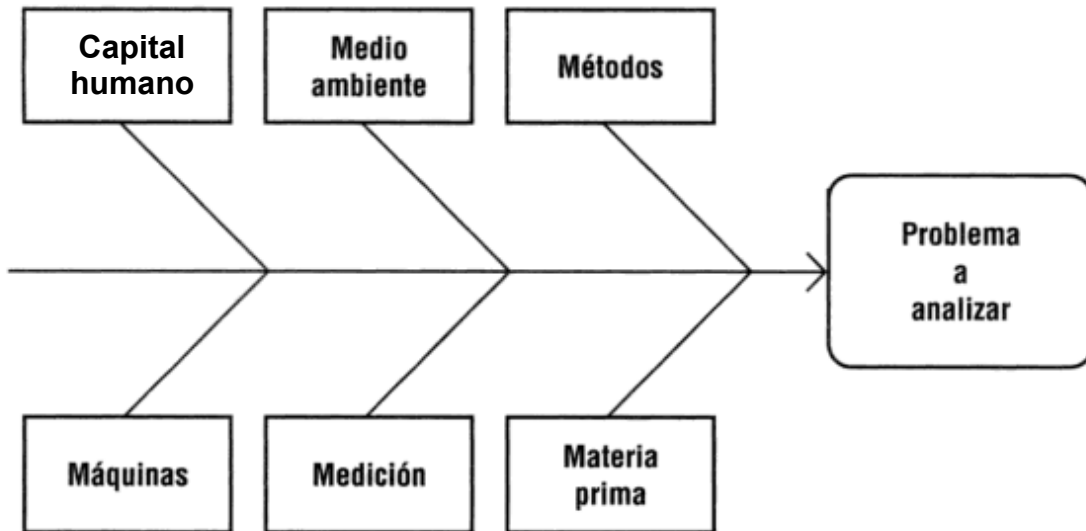


Figura 2. Diagrama de Ishikawa (Escalante, 2006).

1.3 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto es un modelo gráfico que busca clasificar las causas de un problema partiendo de la más significativa hasta la menos significativa. Bautizada con este nombre por Wilfredo Pareto, son representaciones gráficas de la regla 80-20, la cual establece que el 80% de los resultados provienen del 20% de las causas (Summers, 2006, p. 245).

El diagrama de Pareto consta de 2 ejes verticales, uno a la izquierda que representa la frecuencia y otro a la derecha que muestra el porcentaje acumulativo de esa frecuencia. La curva de frecuencia acumulativa identifica los factores vitales que deben ser atendidos de manera inmediata por la alta dirección. (Krajewski y Ritzman, 2000, p. 228).

A continuación, se presenta un ejemplo de un diagrama de Pareto que analiza las causas de paro, en la línea de producción de una fábrica de coches. Ver figura 3.

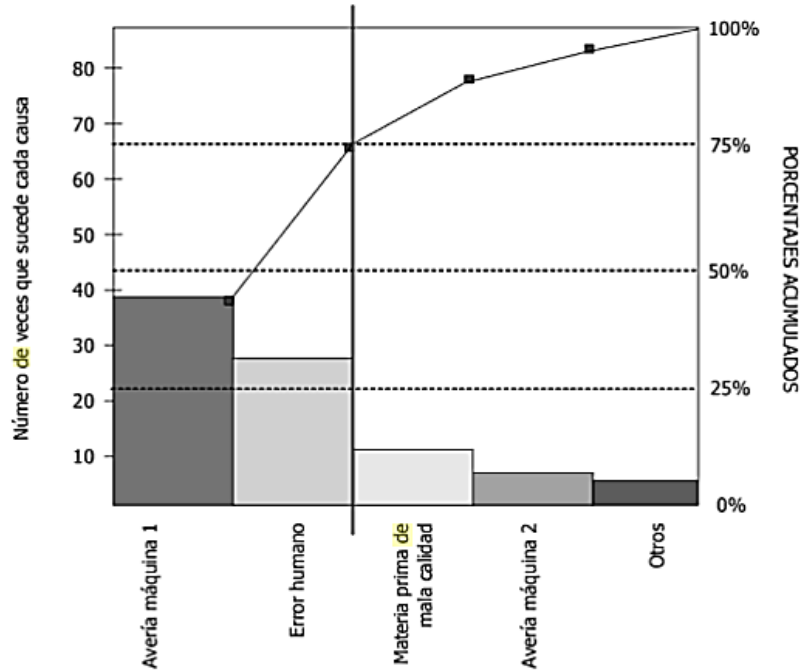


Figura 3. Ejemplo de un diagrama de Pareto (Miranda et al., 2007).

1.4 Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP)

El sistema de Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico (HACCP) se desarrolló en los Estados Unidos a finales de los años 50 con el propósito de garantizar la seguridad alimentaria, inicialmente para los programas espaciales. Este enfoque, basado en el Análisis de Fallos, Modos y Efectos (AMEF), fue diseñado por Pillsbury en colaboración con la NASA y el ejército estadounidense.

La primera presentación formal del HACCP ocurrió en la *"National Conference of Food Protection"*, donde se introdujo el concepto original. Este sistema surgió como una alternativa más confiable frente a los métodos de control basados únicamente en el análisis del producto final, los cuales no ofrecían suficiente seguridad.

Aunque inicialmente no tuvo una amplia aceptación, en 1980 recibió un importante respaldo institucional, particularmente de la Organización Mundial de la Salud, lo que impulsó su incorporación en regulaciones nacionales. (Safe Food Alliance Team, 2019).

El sistema HACCP incluye pasos y principios fundamentales para garantizar la

seguridad en procesos específicos. Uno de estos pasos clave es la verificación del diagrama de flujo, esto permite corroborar la información y realizar ajustes si es necesario.

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de México ([SAGARPA, 2018](#)), el sistema HACCP se basa en siete principios basados en las directrices del Codex Alimentarius, los cuales se enumeran a continuación:

1. Conducción del análisis de peligros.
2. Determinar los puntos críticos de control (PCC).
3. Establecer límites críticos.
4. Establecer procedimientos de vigilancia para el control del PCC.
5. Establecer acciones correctivas que han de adoptarse, cuando la vigilancia indica que el límite crítico del PCC ha sido rebasado.
6. Establecer procedimientos de verificación para confirmar que el plan HACCP está funcionando.
7. Establecer un sistema de documentación sobre todos los procedimientos y registros apropiados para estos principios y su aplicación.

A continuación, se muestra un ejemplo de formato del plan HACCP, basado en los 7 principios obtenidos de la SAGARPA, ver **figura 4**.

A) Paso del proceso	B) Peligro	Fuente	Medi- das de control	Punto critico de control	Limites criticos	Monitoreo				Ac- ciones correcti- vas	Verifi- cación	Registro
						¿Qué?	¿Cómo?	¿Cuándo?	¿Quién?			
1. Recep- ción	F											
	Q											
	M											
2. Descon- gelado	F											
	Q											
	M											

Figura 4. Formato de plan HACCP para el control de peligros en la polimerización de aceites comestibles. (SAGARPA, 2018).

1.5 Proceso de producción de aceites comestibles en México

La producción de aceites comestibles en México abarca una serie de etapas que transforman las semillas oleaginosas en productos aptos para el consumo humano. Las principales materias primas utilizadas incluyen soya, canola, cártamo y palma de aceite.

De manera general, el proceso se compone de las siguientes fases ([Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2017](#); [Comité Nacional Sistema-Producto Oleaginosas, 2023](#)):

1. Recepción y almacenamiento de materias primas: Las semillas oleaginosas se reciben y almacenan en condiciones óptimas para preservar su calidad hasta su procesamiento.
2. Preparación de las semillas: Esta etapa incluye la limpieza para eliminar impurezas, el descascarado si es necesario y el acondicionamiento térmico para facilitar la extracción del aceite.
3. Extracción del aceite: Existen dos métodos principales:
 - Prensado mecánico: Se aplica presión mecánica para extraer el aceite de las semillas.
 - Extracción por solventes: Se utiliza un disolvente orgánico, como el hexano, para disolver y extraer el aceite de las semillas.
4. Desgomado: El aceite crudo extraído contiene fosfátidos y otras impurezas que se eliminan mediante el desgomado, mejorando su estabilidad y calidad.
5. Neutralización: Se eliminan los ácidos grasos libres presentes en el aceite crudo mediante la adición de una solución alcalina, formando jabones que luego se separan del aceite.
6. Blanqueo: El aceite se trata con tierras de blanqueo o arcillas activadas para eliminar pigmentos, metales traza y otros contaminantes que afectan el color y la estabilidad del producto final.
7. Desodorización: Mediante la aplicación de vapor a alta temperatura y en condiciones de vacío, se eliminan compuestos volátiles responsables de olores y

sabores indeseables en el aceite.

8. Almacenamiento y envasado: El aceite refinado se almacena en condiciones controladas y se envasa en recipientes adecuados para su distribución y venta.

Es importante destacar que, aunque estas etapas representan el proceso general, pueden existir variaciones dependiendo del tipo de semilla y del producto final deseado.

1.5.1 Causas de pérdida de calidad en los aceites comestibles

La calidad de los aceites comestibles puede deteriorarse debido a diversos factores que afectan sus propiedades organolépticas, nutricionales y de seguridad. A continuación, se presentan las principales causas de pérdida de calidad en el proceso de producción de aceites comestibles:

- **Oxidación:** La oxidación es una de las causas más frecuentes de deterioro en aceites comestibles. Esta se produce cuando los ácidos grasos insaturados reaccionan con oxígeno y forman peróxidos junto con compuestos volátiles que afectan aroma, sabor y su valor nutricional (Juárez, 2007; FAO, 2021). Factores como el contacto con el aire, la luz, el calor o la presencia de trazas metálicas aceleran este proceso.
- **Polimerización:** Este fenómeno se presenta cuando los ácidos grasos son expuestos a temperaturas elevadas y comienzan a reaccionar entre sí, formando cadenas de mayor longitud. Como consecuencia de esto, el aceite se vuelve más viscoso y pierde parte de su funcionalidad. (Gunstone, 2013; Shahidi, 2005).
- **Hidrólisis:** Este fenómeno ocurre cuando el aceite entra en contacto con agua, esta reacción ocasiona el rompimiento de triglicéridos y libera ácidos grasos libres junto con glicerol, lo que incrementa la acidez del aceite y reduce su estabilidad. También genera sabores indeseados que afectan la aceptación del producto (Juárez, 2007).
- **Degradación térmica:** La exposición constante a altas temperaturas ocasiona la descomposición de los triglicéridos y genera radicales libres, compuestos volátiles y polímeros; este tipo de degradación ocasiona la modificación del color, el olor y la textura del aceite, reduciendo su calidad funcional. También puede llegar a producirse cuando los equipos operan fuera de los rangos recomendados, lo que resalta la importancia de contar con monitoreo de procesos y mantenimiento

preventivo para evitar desviaciones.

- **Contaminación:** Durante el almacenamiento, traslado o manipulación del aceite, existe el riesgo de contaminación física (polvo, partículas sólidas), química (residuos de pesticidas o metales pesados), o microbiológica (mohos, bacterias); estas impurezas actúan como catalizadores de reacciones de oxidación o hidrólisis, y además pueden comprometer la inocuidad del producto final (FAO, 2021).
- **Degradación fotoquímica:** La luz, en especial la radiación ultravioleta, acelera la oxidación de los aceites y modifica sus propiedades como el color, el sabor y la concentración de antioxidantes naturales; este tipo de deterioro aparece cuando los aceites se almacenan en envases transparentes o en lugares con exceso de iluminación, por lo que el uso de recipientes opacos o ambientes con baja luminosidad resulta esencial para su conservación.

Con este marco de referencia se lograron distinguir seis etapas del proceso de producción en las que existen condiciones propicias para que ocurra la polimerización. La elección no fue arbitraria: se tomó en cuenta, por un lado, el efecto que cada etapa tiene sobre las variables críticas como temperatura, presión, humedad, presencia de catalizadores o contaminantes; y, por otro, su importancia en la conservación de la estabilidad del aceite. Para sustentar esta delimitación se consultaron fuentes científicas reconocidas (Gunstone, 2013; FAO, 2021; Shahidi, 2005) y también reportes técnicos derivados de experiencias industriales.

Las seis etapas propuestas **teóricamente** para el análisis son las siguientes:

1. Selección y preparación del aceite

El proceso inicia con la elección del aceite que se va a trabajar, un punto clave porque cada variedad de estos (soya, palma, girasol) presenta composiciones distintas de ácidos grasos que determinan cómo responderá a tratamientos térmicos (Erickson, 1995). Tras la selección, el aceite se somete a una

primera filtración para retirar sedimentos y residuos orgánicos que podrían interferir en las siguientes operaciones. En la práctica, este paso asegura una base más homogénea y disminuye la posibilidad de reacciones catalizadas por impurezas. Algunas industrias complementan esta limpieza con centrifugado o clarificación, logrando un aceite crudo más estable antes de la deshidratación. Así, esta etapa funciona como primer punto de control, pues una falla aquí abre la puerta a contaminantes que complican el rendimiento posterior.

2. Deshidratación

La humedad residual es uno de los factores que más llega a afectar la estabilidad de un aceite. Por ello, la deshidratación se debe realizar a temperaturas moderadas, entre 100 y 120 °C, permitiendo la evaporación del agua sin modificar la estructura de los triglicéridos. Si esta etapa no se controla, pueden aparecer burbujas, emulsiones y reacciones de hidrólisis. En instalaciones con mayor tecnología, se utiliza vacío para reducir el punto de ebullición del agua y disminuir riesgos térmicos. Con ello se garantiza que el aceite llegue a las siguientes fases sin condiciones que favorezcan oxidación temprana o degradación.

3. Desodorización

La desodorización es una de las fases más delicadas, ya que se emplean temperaturas elevadas (180–270 °C) bajo condiciones de vacío. Su objetivo consiste en eliminar compuestos volátiles responsables de olores y sabores indeseados, pero, si no se llega a controlar debidamente, puede activar reacciones secundarias como oxidación o polimerización ([Shahidi, 2005](#)). Por esta razón se requiere un control estricto de temperatura, presión, tiempo y atmósfera. Pequeñas desviaciones en estas variables pueden comprometer la calidad final, lo que justifica considerar esta etapa como crítica dentro de

cualquier sistema de prevención.

4. Modificación química

En determinados procesos se utilizan catalizadores para modificar la estructura del aceite, aunque su empleo no siempre es habitual en la producción de aceites comestibles. Sin embargo, restos de tratamientos anteriores o incluso ciertas interacciones con el entorno pueden dar lugar a cambios indeseados que favorezcan la polimerización. Según Gunstone (2007), la formación de enlaces cruzados entre moléculas lipídicas reduce la estabilidad térmica del producto y lo vuelve más susceptible al deterioro. Para minimizar este riesgo resulta clave mantener limpias las líneas de proceso, evitar el contacto con materiales reactivos y controlar parámetros como acidez, índice de peróxidos y contenido de compuestos polares. En algunos casos también se recurre al uso de antioxidantes o aditivos, que ayudan a frenar las reacciones en cadena.

5. Enfriamiento

Posterior al tratamiento térmico, el aceite debe enfriarse de manera gradual. Si el enfriamiento es brusco, se pueden llegar a generar tensiones internas, cambios en la viscosidad o formación de cristales no deseados. Gunstone (2012) resalta que este paso resulta fundamental para evitar reacciones secundarias. Los sistemas de control térmico permiten reducir la temperatura de forma lenta y uniforme hasta los niveles seguros. Además, se busca limitar el contacto con oxígeno mientras el aceite está caliente, pues en esas condiciones la oxidación se inicia con rapidez.

6. Refinamiento, filtrado final y almacenamiento

Al concluir el proceso, el aceite debe atravesar un filtrado final que elimine partículas y subproductos del calentamiento. Se emplean filtros multicapa

que aseguran pureza sin alterar la composición lipídica. Posteriormente se realizan pruebas de índice de acidez, estabilidad oxidativa y viscosidad para verificar la calidad. Finalmente, el aceite se envasa en recipientes opacos y herméticos y se almacena en condiciones estables, lejos de la luz y del calor, para evitar que se reactiven procesos de deterioro.

CAPITULO II

METODOLOGÍA

2.1 Identificación de áreas de mejora

Para identificar las etapas que podrían llegar a favorecer la polimerización no deseada en aceites comestibles, es fundamental comprender el trayecto general que sigue el producto a lo largo de su proceso productivo. Tener una visión completa del diagrama de flujo permite no solo entender cómo se transforma el aceite desde su recepción hasta su almacenamiento, sino también detectar con mayor claridad en qué puntos se podrían generar desviaciones, fallos o condiciones inestables que comprometan su calidad.

El diagrama de flujo es una herramienta especialmente útil para este tipo de análisis, ya que permite visualizar de forma estructurada cada una de las fases del proceso. Su utilidad no radica únicamente en el ordenamiento gráfico de las operaciones, sino en su capacidad para mostrar cómo interactúan diferentes variables (como temperatura, presión, exposición al oxígeno, tiempo de permanencia o calidad de la materia prima), todas ellas asociadas a la posible formación de polímeros durante el procesamiento. Además, al representar el proceso completo de manera clara y lógica, el diagrama se convierte en un recurso de comunicación interna que facilita que todos los involucrados comprendan el sistema en su conjunto. Esto resulta clave al momento de tomar decisiones informadas, ya sea para ajustar parámetros críticos o para implementar controles más efectivos.

El siguiente diagrama (**Figura 5**) presenta una representación general del proceso de producción de aceites comestibles, en la que se destacan las etapas relevantes para el análisis posterior. Con esta estructura se abre la posibilidad de aplicar herramientas como HACCP, Ishikawa, AMEF y Pareto para anticipar riesgos y proponer mejoras.

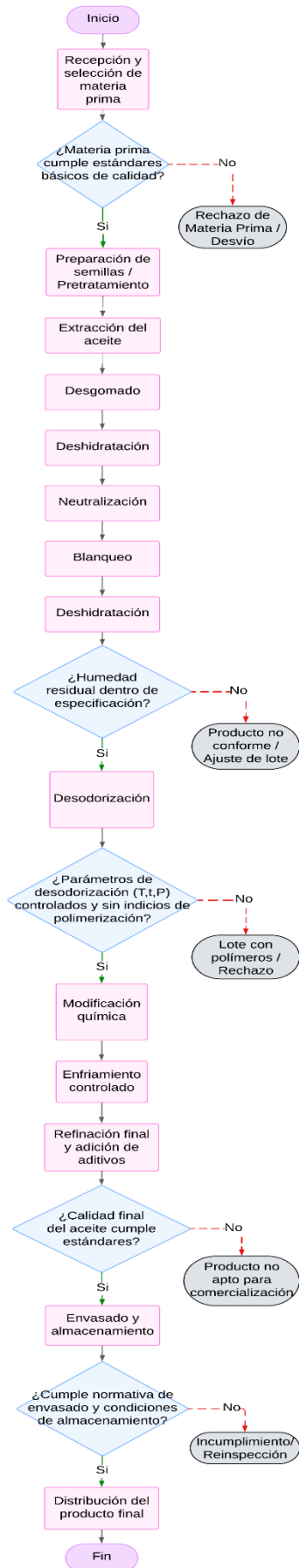


Figura 5. Diagrama de flujo del proceso general de producción del aceite comestible. (Fuente: propia)

2.2 Desarrollo del diagnóstico del proceso actual y áreas de mejora en calidad y seguridad.

Con base en lo observado en el diagrama de flujo se llevó a cabo un diagnóstico de cada etapa del proceso, con el fin de ubicar aquellas áreas donde la calidad o la inocuidad del aceite podrían llegar a verse comprometidas. El análisis permitió reconocer variables críticas como la temperatura, la exposición al oxígeno, la dosificación de aditivos y la humedad; que si no se llegan a controlar a tiempo, estas condiciones pueden favorecer reacciones indeseadas, entre ellas la polimerización durante el procesamiento.

Para organizar la detección y el manejo de estos riesgos se decidió aplicar la metodología HACCP, que nos facilitará la identificación de puntos críticos en cada fase y permite establecer medidas preventivas que mantengan los riesgos bajo control.

2.3 Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP)

En este trabajo, la aplicación del sistema HACCP tomó como referencia la guía publicada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2018), titulada *Guía básica para la elaboración de un plan de análisis de peligros y puntos críticos de control para establecimientos TIF*. Este documento ofrece un enfoque práctico para diseñar planes de inocuidad, y sus lineamientos se ajustaron a las condiciones específicas del proceso estudiado.

Siguiendo los siete principios del sistema HACCP, se identificaron los peligros asociados a cada etapa del proceso, su naturaleza (física, química o biológica), la probabilidad de ocurrencia, las medidas preventivas disponibles y, en su caso, los Puntos Críticos de Control (PCC) necesarios para prevenir la aparición de polimerización no deseada y otros riesgos críticos. El desarrollo teórico detallado de este análisis se presenta a continuación:

Principio 1: Conducción del análisis de peligros.

En esta etapa se identifican los peligros (biológicos, químicos y físicos) presentes en cada fase del proceso.

- **Selección y preparación del aceite:** Peligro de contaminantes físicos y químicos presentes en el aceite crudo que pueden comprometer la calidad. Se deben realizar pruebas iniciales de pureza.
- **Deshidratación:** Riesgo de oxidación si no se controla la exposición al aire. Un peligro químico relevante es la posible formación de subproductos de oxidación.
- **Desodorización:** Peligro químico debido a la posible formación de compuestos de oxidación o poliméricos si no se controla adecuadamente la temperatura y el vacío. También existe peligro físico por operar a alta temperatura bajo condiciones de vacío, lo cual puede representar riesgo térmico o de sobrepresión.
- **Modificación química:** Peligro de exposición a catalizadores o estabilizadores que deben dosificarse y manipularse adecuadamente.
- **Enfriamiento:** Riesgo de degradación por choque térmico si la temperatura baja muy rápidamente.
- **Refinamiento y almacenamiento final:** Riesgo de contaminación química o microbiana si no se maneja en condiciones controladas.

Principio 2: Determinación de los puntos críticos de control (PCC)

Los PCC son las etapas donde es esencial controlar ciertos parámetros para prevenir o eliminar peligros:

- **Selección y preparación del aceite:** Realizar pruebas de calidad iniciales, como

cromatografía, para verificar que el aceite cumple con los estándares.

- **Deshidratación:** Control de la temperatura para evitar la formación de subproductos. El proceso debe alcanzar entre 100-120°C para remover agua sin oxidar el aceite.
- **Desodorización:** Mantener la temperatura entre 180-270 °C bajo condiciones de vacío, evitando tiempos prolongados y contacto con oxígeno. El uso de vapor o nitrógeno puede complementar la protección contra la oxidación.
- **Modificación química:** Control de la cantidad y tipo de catalizadores, que deben dosificarse con precisión.
- **Enfriamiento:** Enfriar el producto gradualmente para evitar una degradación molecular.

Principio 3: Establecimiento de límites críticos

Los límites críticos son valores específicos que no deben excederse en cada PCC:

- **Deshidratación:** Temperatura $\leq 120^{\circ}\text{C}$ y tiempo específico para remover humedad sin afectar la composición del aceite.
- **Desodorización:** Temperatura entre 180-270 °C, presión de vacío inferior a 10 mbar y tiempo de exposición controlado según el tipo de aceite. Se debe asegurar la mínima presencia de oxígeno en la cámara.
- **Modificación química:** Concentra la adición de catalizadores en una cantidad fija, evitando una variación superior al 5%.
- **Enfriamiento:** Temperatura controlada, con un enfriamiento gradual para evitar cambios bruscos.

Principio 4: Establecimiento de procedimientos de vigilancia para el control del PCC (monitoreo)

Monitorear constantemente los parámetros críticos para asegurar que los límites se mantengan:

- **Deshidratación:** Sensores de temperatura y sistemas de alarma en caso de que la temperatura supere el límite.
- **Desodorización:** Monitoreo continuo de temperatura, presión de vacío y tiempo de permanencia. Se deben registrar los niveles de oxígeno residual si se usa atmósfera inerte complementaria.
- **Modificación química:** Sistema automatizado para medir la dosificación de catalizadores.
- **Enfriamiento:** Monitoreo de temperatura mediante sensores para asegurar que el enfriamiento sea gradual.

Principio 5: Acciones correctivas

Acciones inmediatas que se toman en caso de que un parámetro crítico se desvíe del límite establecido:

- **Deshidratación:** Detener el proceso y verificar la calidad del aceite para descartar oxidación.
- **Desodorización:** Ajustar la temperatura o presión de vacío y reducir el tiempo de exposición. Verificar niveles de oxígeno. Si se supera el límite crítico, se debe evaluar la calidad del aceite y aislar el lote afectado.
- **Modificación química:** Revisar el sistema de dosificación y eliminar cualquier lote que no cumpla con los parámetros.

Principio 6: Establecimiento de procedimientos de verificación para confirmación que el plan HACCP está funcionando.

Revisión regular de los procedimientos y límites críticos para asegurarse de que el sistema sigue siendo eficaz.

Principio 7: Establecimiento de un sistema de documentación sobre todos los procedimientos y registros apropiados para estos principios y su aplicación.

Registrar cada monitoreo y acción correctiva para cumplir con las regulaciones de calidad y seguridad alimentaria. Se completa el formato mostrado en la **Figura 4**, a partir de toda la información recabada, obteniendo lo mostrado en la Tabla 1:

A) Paso del proceso	B) Peligro	Fuente	Medidas de control	Punto crítico de control	Límites críticos
1. Selección y preparación del aceite	F/Q	Contaminantes en aceite crudo	Pruebas iniciales de pureza	Análisis de pureza	Cumplir con especificaciones de calidad
2. Deshidratación	Q	Oxidación por exposición al aire	Control de temperatura y atmósfera	Temperatura	≤ 120 °C
3. Desodorización	F/Q	Exposición prolongada a alta temperatura y oxígeno	Control de temperatura, presión de vacío y tiempo de exposición	Temperatura y presión	180 - 270 °C, presión <10 mbar, exposición limitada
4. Modificación química	Q	Catalizadores y estabilizadores	Dosificación precisa de catalizadores	Dosificación precisa	Variación máxima del 5%
5. Enfriamiento	F/Q	Cambios bruscos de temperatura	Control de velocidad de enfriamiento	Temperatura controlada	Enfriamiento gradual
6. Refinamiento y almacenamiento	Q/B	Contaminación química o microbiana	Condiciones controladas de manejo y almacenamiento	Limpieza y sanitización	Cumplir con normas de limpieza e higiene

Tabla 1. Plan HACCP para el proceso de polimerización de aceite comestible. (continúa en la siguiente página). Fuente: propia.

Monitoreo				Acciones correctivas	Verificación	Registro
¿Qué?	¿Cómo?	¿Cuándo?	¿Quién?			
Análisis de cromatografía	Uso de equipo especializado	Antes de iniciar el proceso	Técnico de laboratorio	Retener lotes contaminados y repetir pruebas	Inspección y aprobación de resultados	Registro de análisis iniciales
Temperatura del proceso	Monitoreo con sensores y alarmas	Continuamente durante el proceso	Operador encargado	Detener el proceso y analizar aceites para descartar oxidación	Calibración de sensores	Registro de monitoreo y alarmas
Sensores y registros del sistema	Monitoreo automático y revisión periódica	Continuamente durante la operación	Personal de control de calidad	Ajustar temperatura, verificar presión de vacío y revisar niveles de oxígeno residual	Revisión de condiciones del sistema y calibración	Registro de temperatura, presión y tiempos
Dosificación de catalizadores	Sistema automatizado con verificación manual	En cada lote	Operador del sistema	Revisar sistema y descartar lotes que no cumplan	Auditoría del sistema de dosificación	Registro de dosificación
Gradiente de temperatura	Sensores de monitoreo continuo	Durante todo el proceso de enfriamiento	Operador del área	Ajustar gradualmente la velocidad de enfriamiento	Calibración periódica de sensores	Registro de monitoreo de enfriamiento
Condiciones de limpieza y almacenamiento	Inspección visual y análisis microbiológico	Periódicamente	Responsable de almacén	Implementar limpieza adicional y verificar condiciones nuevamente	Verificación de cumplimiento de normas	Registro de inspecciones y limpieza

Tabla 1. Plan HACCP para el proceso de polimerización de aceite comestible (continuación). (Ver detalle en anexo A).

En este proyecto, el sistema HACCP se utilizó para identificar y clasificar los principales peligros que, de no controlarse a tiempo, pueden favorecer la formación de polímeros no deseados durante el procesamiento del aceite. Esta metodología permitió poner atención en las etapas más sensibles del proceso, tomando en cuenta tanto la calidad del producto como la seguridad de las operaciones.

Dentro de los riesgos detectados sobresalen los de tipo físico, por ejemplo la presencia de partículas o residuos sólidos en la materia prima. Cuando el aceite se somete a altas temperaturas, estos elementos pueden comportarse como catalizadores y acelerar reacciones químicas no deseadas, a ello se suman los riesgos químicos, relacionados con trazas de solventes, metales pesados o errores en la dosificación de aditivos, todos ellos factores que disminuyen la estabilidad del aceite y aumentan la probabilidad de oxidación o polimerización; y por último, se evaluaron riesgos microbiológicos asociados a la recepción, almacenamiento y manipulación del producto. Aunque no inducen directamente la polimerización, sí deterioran la calidad general y pueden descomponer componentes clave del aceite, lo que hace necesaria su vigilancia dentro del plan de acción.

2.4 Diagrama de Ishikawa

En este proyecto se empleó el diagrama de Ishikawa como apoyo visual para ordenar y analizar las posibles causas raíz que pueden dar lugar a la polimerización no deseada en los aceites comestibles.

Esta técnica permite vincular un efecto negativo con las posibles fuentes que lo originan, clasificándolas en categorías que facilitan su análisis y priorización.

Para la elaboración del diagrama se siguió el enfoque propuesto por Besterfield *et al.* (2011), quienes en las páginas 391 a 393 explican el uso del diagrama de Ishikawa como una herramienta fundamental para identificar, clasificar y analizar causas raíz de problemas de calidad en los procesos productivos.

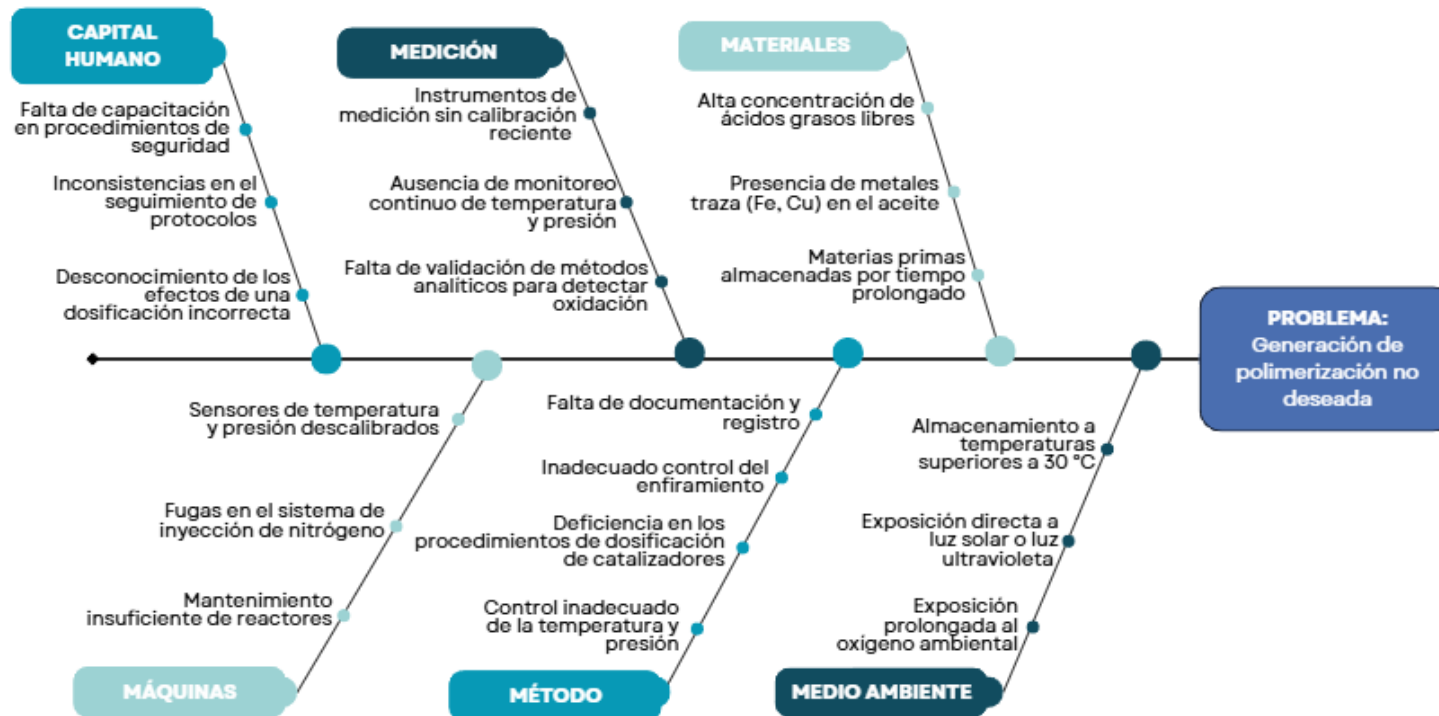


Figura 6. Diagrama de Ishikawa para identificar causas de problemas en calidad y seguridad en la polimerización de aceites. (Fuente: propia)

Dentro de la categoría **Materiales**, se sugiere controlar las variaciones en la calidad del aceite crudo, en particular su pureza y el contenido de ácidos grasos insaturados, ya que estos compuestos son más susceptibles a oxidarse y polimerizarse bajo condiciones térmicas inadecuadas. Factores adicionales como la presencia de metales traza (Fe, Cu), la falta de antioxidantes y la recepción de aceites con signos de oxidación inicial también contribuyen directamente a la polimerización no deseada.

En cuanto al **Método**, se señala una falta de estandarización en etapas críticas como el deshidratado, el control térmico y el almacenamiento. Esta carencia genera condiciones variables difíciles de controlar y propensas a desviaciones del proceso.

En la categoría de **Medición**, se detectan deficiencias en la precisión y confiabilidad de los instrumentos de monitoreo. Problemas como la falta de calibración, el uso de sensores poco precisos o una baja frecuencia de muestreo dificultan detectar desviaciones a tiempo. En consecuencia, el aceite puede permanecer bajo condiciones que favorecen la formación de polímeros.

En el área de **Maquinaria** se identificaron fallas frecuentes: sensores descalibrados, fugas en las líneas de inyección de nitrógeno y deficiencias en el mantenimiento de los reactores. Estas situaciones comprometen el control del proceso y aumentan el riesgo de oxidación por contacto con oxígeno.

También se observaron factores de **Medio Ambiente** que influyen de manera directa. La exposición del aceite a la luz, al aire o a temperaturas elevadas durante el almacenamiento acelera su degradación y facilita la polimerización en etapas posteriores.

Por último, en el apartado de **Capital Humano**, la carencia de capacitación técnica limita la capacidad del personal para detectar condiciones anormales o responder a tiempo frente a desviaciones críticas, lo que impacta de forma negativa en la calidad final del producto.

2.5 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto en este proyecto se construyó siguiendo el enfoque descrito por Besterfield et al. (2011, pp. 389–391), quienes lo plantean como una herramienta útil para reconocer y ordenar las causas que tienen mayor impacto en la calidad de un proceso. Bajo este principio se utilizó el método para destacar los factores más influyentes en la polimerización no deseada de los aceites comestibles.

El propósito fue ubicar las fallas más frecuentes y darles prioridad, de manera que los esfuerzos de prevención se concentren en los puntos que puede llegar a generar un mayor riesgo. Para ello se definieron dos criterios principales:

- la frecuencia de ocurrencia de cada tipo de falla,
- y su impacto estimado sobre la calidad del producto final y la seguridad del proceso.

A partir del análisis del modelo de proceso y de información recopilada en fuentes técnicas y literatura especializada, se identificaron teóricamente las siguientes siete fallas críticas:

1. **Falla en el control de temperatura:** Variaciones de temperatura durante la etapa de polimerización o tratamiento térmico, que alteran la estabilidad y viscosidad del aceite.
2. **Contaminación del aceite crudo:** Presencia de impurezas o residuos sólidos que comprometen la calidad desde las primeras etapas del proceso.
3. **Descalibración de sensores de temperatura y presión:** Instrumentos imprecisos que dificultan el control exacto del proceso, generando desviaciones peligrosas.
4. **Fugas en el sistema de nitrógeno:** Pérdidas en la atmósfera inerte que permiten la entrada de oxígeno, promoviendo reacciones de oxidación.
5. **Falta de capacitación del personal:** Carencia de conocimientos técnicos necesarios para operar equipos bajo condiciones críticas de temperatura y presión.
6. **Variación en la dosificación de catalizadores:** Dosis incorrectas que pueden modificar la estructura química del producto y reducir su calidad.
7. **Falta de ventilación adecuada:** Acumulación de vapores y gases en la zona de trabajo, que representan riesgos tanto de seguridad como de contaminación.

A continuación, se presenta una tabla con datos de frecuencia estimada en función de ocurrencias anuales, basada en modelos teóricos. Se aclara que estos valores pueden ser ajustados con base en datos reales obtenidos en cada planta específica de polimerización, para lograr un análisis más preciso y aplicable. Ver **tabla 2**.

Tabla 2. Frecuencia de fallas y su impacto en el proceso de polimerización de aceites comestibles. (Fuente: propia)

Falla	Frecuencia (N° de ocurrencias)	Impacto relativo (%)
Falla en el control de temperatura	120	Alta
Contaminación en el aceite crudo	85	Alta
Descalibración de sensores	60	Media
Fugas en el sistema de nitrógeno	50	Alta
Falta de capacitación del personal	40	Media
Variación en la dosificación	30	Media
Falta de ventilación adecuado	15	Baja

Los datos de frecuencia y de impacto relativo dados en este ejercicio son hipotéticos y no basados en datos reales específicos de algún proceso de polimerización de aceites.

Estos datos siguen una secuencia lógica del proceso, a partir de lo documentado en el marco teórico y del análisis del diagrama de flujo de proceso.

Para evaluar la relevancia de cada tipo de falla dentro del sistema, se utiliza el diagrama de Pareto, una herramienta de análisis que permite identificar y clasificar los problemas más significativos. Este diagrama se determina a partir del cálculo de la ocurrencia de cada falla en relación con el total de eventos registrados.

El proceso teórico que se sigue se detalla a continuación:

1. Registro de eventos y fallas: Se lleva a cabo la identificación y clasificación de las fallas que ocurren en el procedimiento, asegurando una adecuada documentación

de su frecuencia.

2. Cálculo de la ocurrencia relativa: Se calcula el porcentaje que representa cada tipo de falla en relación con el total de eventos registrados.
3. Cálculo del impacto acumulado: Se suma el efecto de las fallas de acuerdo con su impacto relativo, lo que facilita la visualización de cuáles problemas tienen las repercusiones más significativas.
4. Elaboración del diagrama de Pareto: Se grafican los datos obtenidos, lo que permite observar la distribución de las fallas y determinar cuáles son las que requieren una atención prioritaria.

En este análisis, se han registrado teórica e idealmente un total de 400 ocurrencias, lo que indica que todas las fallas detectadas suman esta cifra. Con esta información, es posible establecer estrategias de mejora dirigidas hacia los problemas más críticos, basándose en el principio 80/20 de Pareto, que sugiere que un número relativamente pequeño de causas es responsable de la mayor parte de los efectos adversos en un proceso. Ver **tabla 3 y figura 7**.

Tabla 3. Porcentaje de contribución e impacto acumulado en el proceso de polimerización de aceites comestibles. (Fuente: propia)

Falla	Frecuencia	% contribución (Frecuencia/Total)	Impacto acumulado (%)
Falla en el control de temperatura	120	30%	30%
Contaminación en el aceite crudo	85	21.25%	51.25%
Descalibración de sensores	60	15%	66.25%
Fugas en el sistema de nitrógeno	50	12.5%	78.75%
Falta de capacitación del personal	40	10%	88.75%
Variación en la dosificación	30	7.5%	96.25%
Falta de ventilación adecuado	15	3.75%	100%

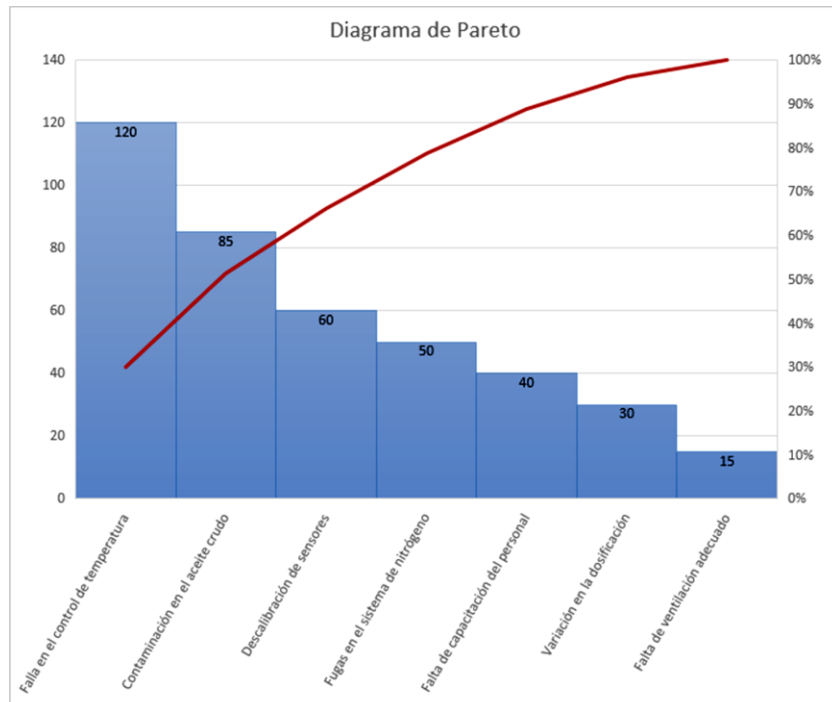


Figura 7. Diagrama de Pareto para el proceso de polimerización del aceite comestible en México (**Fuente: propia**)

El análisis de Pareto se utilizó como herramienta de priorización para identificar cuáles de las causas detectadas en el proceso de producción tienen el mayor impacto en la aparición de polimerización. Aplicando el principio 80/20, se evaluaron un total de 400 fallas potenciales, clasificadas según frecuencia e impacto. De estas, se identificaron cuatro causas principales que acumulan el 78.75 % del efecto total observado:

1. Falla en el control de temperatura.
2. Contaminación del aceite crudo.
3. Descalibración de sensores.
4. Fugas en el sistema de nitrógeno.

Estas causas que se propusieron se convirtieron en prioridades dentro del sistema de gestión propuesto. Las acciones correctivas idealizadas derivadas de este análisis incluyeron:

- Implementación de sensores de temperatura en tiempo real con alarmas automáticas.
- Mejora en los sistemas de filtrado y control de impurezas desde la recepción del aceite crudo.
- Establecimiento de un programa de mantenimiento preventivo para equipos de medición.
- Revisión y ajuste de las líneas de inyección de nitrógeno para prevenir la oxidación.

Con base en estos hallazgos, se diseñaron y propusieron estrategias orientadas a reducir el riesgo en las zonas de mayor vulnerabilidad, lo cual refuerza la lógica preventiva del plan de acción.

2.6 Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF).

El análisis modal de fallos y efectos (AMEF) permite identificar modos de falla en el proceso de polimerización, sus efectos y causas, y priorizar acciones de mejora para reducir riesgos. La metodología se enfoca en analizar los siguientes aspectos:

Identificación de modos de falla en cada etapa

1. Selección y preparación del aceite

- **Modo de falla:** Contaminación física o química en el aceite crudo.
- **Causas:** Impurezas no detectadas, fallos en los filtros.
- **Efecto:** Deterioro de la calidad y presencia de partículas que afectan el producto final.

2. Deshidratación

- **Modo de falla:** No se alcanza la temperatura adecuada para remover agua.

- **Causas:** Calentadores defectuosos, sensores de temperatura inexactos.
- **Efecto:** Formación de subproductos no deseados que alteran la composición.

3. Desodorización

- **Modo de falla:** Exposición prolongada a alta temperatura o presencia de oxígeno durante el proceso.
- **Causas:** Fugas en el sistema de vacío, fallo en el control de temperatura.
- **Efecto:** Formación de compuestos de oxidación o polímeros no deseados, afectando la estabilidad, sabor y calidad del aceite.

4. Modificación química

- **Modo de falla:** Dosificación incorrecta de catalizadores.
- **Causas:** Error humano o defecto en el sistema de dosificación.
- **Efecto:** Alteración en la estabilidad del producto, afectando su funcionalidad.

5. Enfriamiento

- **Modo de falla:** Enfriamiento rápido que causa inestabilidad en el aceite.
- **Causas:** Control inadecuado de temperatura.
- **Efecto:** Degradación de la estructura molecular.

6. Refinamiento y almacenamiento

- **Modo de falla:** Contaminación durante el almacenamiento.
- **Causas:** Envases inadecuados, exposición al aire.
- **Efecto:** Pérdida de calidad debido a oxidación y contaminación microbiana.

Evaluación de la severidad, ocurrencia y detección

Cada modo de falla se evalúa para determinar la severidad del efecto, la probabilidad de ocurrencia y la dificultad de detección:

- Severidad (S): Grado de impacto de la falla en la calidad del producto o la seguridad del proceso.
- Ocurrencia (O): Probabilidad de que ocurra la falla.
- Detección (D): Facilidad para detectar la falla antes de que afecte el producto.

La tabla de criterios para la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Exposición (E) utilizada en el ejemplo está basada en el método de William Fine, ajustada para ser aplicable al contexto de un AMEF en procesos industriales. La **tabla 4** muestra los criterios para la evaluación de severidad, ocurrencia y exposición utilizada en este documento que fue la siguiente:

Tabla 4. Tabla de criterios para la severidad, ocurrencia y exposición para el método AMEF. (Fuente: propia)

Valor	Severidad (S)	Ocurrencia (O)	Exposición (E)
1	Sin impacto	Improbable	Exposición rara o nula
2-3	Impacto bajo	Baja probabilidad de ocurrencia	Exposición ocasional
4-5	Impacto moderado	Probable en condiciones específicas	Exposición frecuente
6-7	Impacto significativo	Moderadamente frecuente	Exposición regular
8-9	Impacto alto	Frecuente	Exposición frecuente a constante
10	Impacto catastrófico	Muy frecuente	Exposición constante

La plantilla utilizada para el desarrollo del AMEF fue proporcionada en el diplomado de “Sistemas de gestión integrados” de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP, en el módulo III.

Tabla 5. AMEF para el proceso de polimerización de aceites comestible. (continúa en la siguiente página (Fuente: propia))

No. ACTIVIDAD	RUTINARIO	NO RUTINARIO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN PELIGRO	PSICOSOCIAL	Q	F	B	M	E	Capacidad	T	P	what if? (falla)	ACTOS INSEGUROS	FACTORES PERSONALES	FACTORES DE LA EMPRESA	RIESGOS ASOCIADOS (consecuencias)
											V/M/Q	° C	K/c m ²					
1	x		Selección y preparación del aceite	Contaminación del aceite crudo		x	x				500 L por lote	N/A	N/A	Pérdida de calidad del producto final	Falta de inspección inicial	Falta de capacitación en control de calidad	Deficiencia en los protocolos de inspección	Producto no apto para consumo
2	x		Deshidratación	Fallo en el control de temperatura			x				500 L por lote	150 - 200 ° C	1.5 K/c m ²	Descomposición del aceite	Operación sin monitoreo continuo	Falta de capacitación del operador	Mantenimiento deficiente de los equipos	Degradación del producto
3	x		Desodorización	Pérdida de control en temperatura y presión de vacío		x	x				500 - 1000 L por lote	180 - 270 ° C	< 0.1 K/c m ²	Formación de polímeros no deseados y pérdida de estabilidad del aceite	Operar sin monitoreo continuo de vacío y temperatura	Desconocimiento de parámetros críticos	Mantenimiento deficiente del sistema de vacío	Formación de compuestos poliméricos no deseados, aumento de viscosidad y pérdida de estabilidad del aceite
4	x		Modificación química	Dosificación incorrecta de catalizadores			x				500 L por lote	180 ° C	1.2 K/c m ²	Producto fuera de la especificación	Uso de medidas aproximadas sin verificación	Falta de entrenamiento en dosificación	Almacenamiento inadecuado de catalizadores	Producto de baja calidad
5	x		Enfriamiento	Enfriamiento rápido		x	x				500 L por lote	50 - 100 ° C	1.0 K/c m ²	Desestabilización molecular	Introducción abrupta del fluido refrigerante	No seguir procedimientos estándar	Falta de automatización en el control térmico	Producto no estable
6	x		Refinamiento y almacenamiento	Contaminación durante el almacenamiento			x		x		1000 L en tanque de almacenamiento	25 - 40 ° C	1.0 K/c m ²	Contaminación del producto	Manipulación sin equipo de protección	Desconocimiento de los procedimientos de higiene	Falta de inspecciones regulares en los tanques	Producto no conforme

Tabla 5. AMEF para el proceso de polimerización de aceites comestible. (continuación). (Ver detalle en anexo B).

N o.	VALOR DE RIESGO				PRIORIZACIÓN				ACEPTABILIDAD		NOMs	CONTROLES	RESPONSABLE	PERIODICIDAD	INDICADOR	KPI
	N D	N E	N C	NR	I I	II I	I V	SI	NO							
1	8	5	4	160						x	NO M-001, 009, 018	Implementar inspección inicial y controles de calidad	Técnico de laboratorio	Inspección previa a cada lote	Índice de pureza del aceite crudo	≥ 99% pureza
2	7	4	5	140						x	NO M-005, 010, 022	Instalar monitoreo en tiempo real de temperatura y presión	Operador encargado	Inspección semanal	Eficiencia de deshidratación	≤ 0.05% de humedad residual
3	9	6	3	162						x	NO M-004, 010, 022	Monitoreo continuo de temperatura, vacío y tiempo de exposición	Personal de control de calidad	Monitoreo continuo por lote	Estabilidad del perfil de ácidos grasos	± 5% del valor objetivo
4	6	5	3	90		x					NO M-010, 018, 022	Implementar sistemas automáticos de dosificación	Operador del sistema	Verificación diaria	Precisión en la dosificación de catalizadores	± 2% del valor objetivo
5	5	3	4	60		x				x	NO M-004, 006, 022	Estandarizar procedimientos de enfriamiento	Operador del área	Inspección mensual	Estabilidad molecular	≥ 95% de consistencia molecular
6	6	4	2	48	x						NO M-001, 005, 006, 009	Implementar prácticas adecuadas de almacenamiento	Responsable de almacén	Revisión trimestral	Control de contaminación	≤ 1% de contaminantes

La aplicación teórica del Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF) al proceso de producción de aceites comestibles permitió detectar los principales riesgos que podrían favorecer la formación de polímeros no deseados a lo largo de las etapas críticas del proceso. A partir de los criterios de severidad, ocurrencia y capacidad de detección, se calcularon los respectivos Índices de Riesgo (IR), los cuales oscilaron entre valores moderados (48) y niveles altos (160), siendo más críticos en las fases de selección del aceite y tratamiento térmico.

En estas etapas, una falla puede provocar reacciones de degradación química que afectan directamente la estabilidad, viscosidad y funcionalidad del producto final. Por

ejemplo, la presencia de contaminantes en el aceite crudo o impurezas metálicas puede actuar como catalizador en procesos de oxidación o polimerización. Asimismo, se identificó que el mal control de la temperatura, tanto por exceso como por fluctuaciones, incrementa significativamente el riesgo de formación de polímeros, especialmente cuando se combinan con tiempo prolongado de exposición o ausencia de una atmósfera inerte.

2.7 Descripción del plan de acción.

Con base en los resultados teóricos obtenidos a través del análisis de riesgos y las herramientas aplicadas, se desarrolló un plan de acción enfocado en la implementación de estas acciones para prevenir la polimerización no deseada en la producción de aceites comestibles. Este plan contempla acciones correctivas y preventivas específicas para cada una de las seis etapas críticas del proceso, alineadas con indicadores clave de desempeño (KPI's), metas cuantificables y normativa aplicable.

La siguiente tabla 6, resume las actividades propuestas, su objetivo, las acciones correctivas sugeridas, los indicadores de control, sus metas esperadas y las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) relacionadas con cada etapa. Este esquema propone y permite establecer un sistema práctico, estandarizado y medible, facilitando su integración dentro de cualquier programa de mejora continua.

Tabla 6. Plan de acción para el proceso de polimerización de aceite comestible en México. (ver detalle en anexo C)

No.	Actividad	Objetivo	Acciones	KPI's	Meta del KPI	NOMs relacionadas
1	Selección y preparación del aceite	Asegurar la calidad y pureza del aceite crudo	-Implementar inspección inicial y controles de calidad -Capacitar al personal en prácticas de inspección y monitoreo	Índice de pureza del aceite crudo	≥ 99% pureza	NOM-001-STPS NOM-009-STPS NOM-018-STPS
2	Control de temperatura en deshidratación	Garantizar una deshidratación eficiente sin degradar el aceite	-Calibrar y mantener los equipos de temperatura -Implementar monitoreo en tiempo real	Eficiencia de deshidratación (contenido de humedad del aceite postratamiento)	≤ 0.05% de humedad residual	NOM-005-STPS NOM-010-STPS NOM-022-STPS
3	Control del proceso de desodorización	Evitar degradación térmica y compuestos indeseados durante la desodorización	-Implementar monitoreo en tiempo real de temperatura, presión de vacío y tiempo de exposición -Establecer protocolos de operación seguros para condiciones de vacío -Capacitar al personal	Estabilidad del perfil de ácidos grasos	± 5% del valor objetivo	NOM-004-STPS NOM-010-STPS NOM-022-STPS
4	Dosificación controlada en modificación química	Asegurar la dosificación correcta de catalizadores	-Implementar sistemas automáticos de dosificación -Capacitar al personal en sistemas automáticos y precisión en dosificación -Control de calidad en adición de catalizadores	Precisión en la dosificación de catalizadores	± 2% del valor objetivo	NOM-010-STPS NOM-018-STPS NOM-022-STPS
5	Control en el proceso de enfriamiento	Evitar el enfriamiento rápido y asegurar estabilidad del producto	-Estandarizar procedimientos de enfriamiento -Implementar controles automáticos para la tasa de enfriamiento -Capacitar al personal en procedimientos adecuados	Estabilidad molecular	≥ 95% de consistencia molecular	NOM-022-STPS NOM-006-STPS NOM-004-STPS
6	Refinamiento y almacenamiento	Prevenir contaminación del aceite durante el almacenamiento	-Implementar prácticas adecuadas de almacenamiento -Realizar controles de calidad periódicos -Capacitar al personal en almacenamiento seguro	Control de contaminación (índice de contaminantes detectados en almacenamiento)	≤ 1% de contaminantes	NOM-006-STPS NOM-001-STPS NOM-005-STPS NOM-009-STPS

La puesta en marcha de este plan de acción requiere de la participación activa de todo el personal, desde la recepción del aceite hasta su almacenamiento final. Para que sea realmente efectivo, se propone designar a un responsable técnico con la formación adecuada que supervise su aplicación; entre sus tareas deberá estar revisar de manera periódica los indicadores definidos, confirmar que los procedimientos se sigan correctamente y ajustar los parámetros de operación de acuerdo con los resultados obtenidos y las condiciones reales de la planta.

Capítulo III

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos se basan en una aplicación teórica de distintas herramientas de análisis orientadas a detectar y prevenir riesgos de polimerización en aceites comestibles. En este caso se trabajó con HACCP, el diagrama de Ishikawa, el análisis de Pareto y el AMEF, aplicados de manera teórica a seis etapas críticas del proceso: selección del aceite, deshidratación, desodorización, modificación química, enfriamiento y almacenamiento.

3.1 Resultados del análisis HACCP

El sistema HACCP permitió, de forma simulada y documental, identificar los puntos críticos del proceso en los que es indispensable aplicar controles específicos que eviten condiciones que propicien la polimerización. El análisis detallado teóricamente reveló tres etapas críticas:

- Deshidratación: Se estableció como límite crítico una temperatura máxima de 120 °C.
- Tratamiento térmico (desodorización): Se sugirió realizar en atmósfera controlada con nitrógeno, evitando la presencia de oxígeno que promueve oxidación y reacciones secundarias.
- Almacenamiento: Se propusieron prácticas específicas como el uso de contenedores opacos, herméticos y con control de temperatura y humedad, ya que condiciones ambientales inadecuadas pueden promover reacciones oxidativas y degradación.

Además de establecer los Puntos Críticos de Control (PCC), se definieron medidas de monitoreo, acciones correctivas y procedimientos de verificación que aseguren su cumplimiento.

3.2 Resultados del diagrama de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa permitió representar de forma estructurada las posibles causas teóricas que podrían favorecer la polimerización no deseada. Las causas se agruparon en seis categorías:

- **Materiales:** Variaciones en la calidad del aceite crudo, como un alto contenido de ácidos grasos libres, presencia de metales traza (Fe, Cu), aceites parcialmente oxidados al momento de recepción y ausencia de antioxidantes estabilizantes. Estas condiciones, a menudo derivadas de procesos de filtrado insuficientes o materias primas de proveedores sin certificación, predisponen al aceite a reaccionar y polimerizarse.
- **Método:** Falta de estandarización en etapas críticas (deshidratado, control térmico y almacenamiento) y carencia de protocolos claros para el calentamiento y la dosificación de aditivos. Estas inconsistencias generan desviaciones de proceso difíciles de detectar y aumentar el riesgo de polimerización.
- **Medición:** Deficiencias en la precisión y confiabilidad de los instrumentos de monitoreo. La falta de calibración periódica de sensores de temperatura y presión, el uso de equipos con márgenes de error elevados y la baja frecuencia de muestreo impiden detectar desviaciones a tiempo, dejando al aceite expuesto a condiciones que favorecen la formación de polímeros.
- **Maquinaria:** Equipos con sensores de temperatura y presión descalibrados, fugas en el sistema de inyección de nitrógeno y mantenimiento insuficiente de reactores. La ausencia de indicadores visuales o alarmas impide conocer en tiempo real si el proceso opera fuera de los rangos óptimos, lo que facilita la formación de polímeros.
- **Medio ambiente:** Exposición del aceite a oxígeno, luz (incluida radiación UV), humedad elevada o temperaturas ambientales superiores a 30 °C durante el almacenamiento y procesamiento. Estas condiciones aceleran la oxidación lipídica, desencadenando reacciones fotoquímicas que promueven la polimerización.

- Capital humano: Carencia de capacitación técnica específica y alta rotación de personal, lo que limita la identificación temprana de condiciones anormales. Errores en la toma de muestras o en la dosificación de catalizadores por desconocimiento o falta de protocolos claros que agravan los desvíos críticos.

El análisis demostró que la polimerización no deseada no proviene de un único factor, sino de la interacción simultánea de múltiples causas. Por ello, el diagrama sirvió de base para diseñar estrategias de formación del personal, calibración de equipos y rediseño de procedimientos, los cuales se integrarán en el plan de acción propuesto.

3.3 Resultados del análisis de Pareto

El análisis de Pareto fue elaborado con base en supuestos documentales, aplicando el principio 80/20 para jerarquizar factores de mayor impacto. A partir de modelos teóricos y revisión de literatura, se estimó que el 78.75 % de los problemas más frecuentes podrían derivarse de:

1. Fallas en el control de temperatura.
2. Contaminación del aceite crudo.
3. Sensores descalibrados.
4. Fugas en el sistema de nitrógeno.

Estas causas fueron consideradas prioritarias y se propusieron acciones correctivas inmediatas como:

- Actualización del sistema de sensores.
- Refuerzo del filtrado inicial.
- Rediseño del plan de mantenimiento preventivo.

Las acciones correctivas propuestas (como actualización de sensores o refuerzo del filtrado) se fundamentan en experiencias industriales previamente publicadas, sin implementación práctica directa en campo.

3.4 Resultados del AMEF

El AMEF permitió evaluar de forma sistemática los posibles modos de falla que pueden favorecer la polimerización, clasificándolos por su severidad, ocurrencia y capacidad de detección, lo que derivó en un índice de riesgo (IR) para cada uno. Es importante destacar que el índice de riesgo (IR) fue calculado de manera teórica, y los controles propuestos (como mantenimiento preventivo o sistemas de monitoreo) fueron definidos en función de estándares y guías normativas.

Los resultados más relevantes fueron:

- Contaminación en la materia prima: residuos metálicos o impurezas que actúan como catalizadores no deseados.
- Descontrol de temperatura en deshidratación y tratamiento térmico: al exceder los límites establecidos, se incrementa el riesgo de reacciones de entrecruzamiento molecular.
- Fugas en el sistema de atmósfera inerte: la entrada de oxígeno promueve reacciones de oxidación que, a su vez, pueden acelerar procesos de polimerización secundaria.

En todos los casos, el IR obtenido de manera teórica fue elevado, lo que justifica la necesidad de establecer controles estrictos, planes de mantenimiento y un monitoreo constante de variables críticas como temperatura, presión y presencia de oxígeno.

3.5 Discusión final

Los resultados teóricamente obtenidos demuestran que la prevención de la polimerización no deseada en aceites comestibles no puede abordarse desde una única perspectiva, sino que requiere una combinación de herramientas, controles y cultura operativa.

Cada herramienta aplicada aportó información desde un ángulo distinto pero complementario:

- El AMEF ayudó a priorizar los modos de falla con mayor impacto.
- El HACCP definió puntos de control específicos y verificables.
- El Ishikawa reveló causas raíz distribuidas a lo largo del proceso.

- El Pareto facilitó la toma de decisiones estratégicas enfocadas en lo esencial.

La integración de todos estos hallazgos dentro de los procesos productivos fortalece la propuesta y la hace viable para su adaptación en plantas productivas reales. Más allá del cumplimiento normativo, como las NOMs aplicables (NOM-251-SSA1-2009 sobre higiene en el proceso de alimentos; NOM-002-STPS-2010 sobre prevención de incendios; NOM-018-STPS-2015 sobre manejo de sustancias químicas peligrosas; y NOM-004-SSA1-2013 sobre materiales en contacto con alimentos), La propuesta representa una estrategia preventiva, técnica y aplicable a futuro, adaptable a contextos reales, pero construida exclusivamente con base en simulación teórica, sin validación práctica directa.

Conclusiones

A lo largo de este trabajo se realizó un análisis teórico del proceso de producción de aceites comestibles con el objetivo de identificar y prevenir uno de los defectos de calidad más relevantes: la polimerización no deseada. Este fenómeno, aunque en ocasiones imperceptible en las primeras etapas del proceso, puede comprometer significativamente la estabilidad, funcionalidad e inocuidad del producto final. La aplicación de herramientas como la metodología HACCP, el diagrama de Ishikawa, el análisis de Pareto y el AMEF permitió comprender que la polimerización no es producto de una única causa, sino de un conjunto de condiciones que deben mantenerse bajo control. Durante el análisis se observaron como factores clave el manejo inadecuado de la temperatura, la exposición al oxígeno, la presencia de impurezas y ciertos errores que derivan de la falta de estandarización en las operaciones. Al aplicar las herramientas de análisis en las seis etapas del proceso desde la selección inicial hasta el almacenamiento se obtuvo un panorama integral de los puntos críticos en los que resulta posible actuar de forma preventiva para resguardar la calidad del aceite.

En términos generales, el trabajo permite concluir lo siguiente:

- La polimerización en aceites comestibles puede evitarse manteniendo bajo control variables críticas en cada etapa sensible del proceso.
- El uso combinado de herramientas técnicas y de gestión facilita la toma de decisiones con base en información objetiva y permite diseñar acciones más eficaces.
- Prevenir el problema no solo mejora la calidad del producto, sino que también disminuye pérdidas por reprocesos, desperdicios y devoluciones.

El desarrollo del proyecto me permitió en lo personal, llevar la teoría a un plano aplicado mediante ejercicios simulados, utilizando procesos reales de ingeniería para abordar un problema complejo.

Aunque no se realizaron pruebas experimentales, la experiencia mostró que es posible generar propuestas técnicas sólidas a partir del análisis documental y normativo.

Recomendaciones

A partir del análisis realizado y de los riesgos detectados, se plantean a continuación algunas acciones orientadas a reforzar la prevención de la polimerización en los procesos industriales de aceites comestibles:

1. Implementar sensores en línea para el monitoreo continuo de temperatura y niveles de oxígeno, acompañados de alarmas que alerten sobre desviaciones de los límites establecidos.
2. Capacitar al personal operativo en el control de variables críticas, enfatizando la relación entre temperatura, atmósfera inerte, tiempo de exposición y la formación de polímeros.
3. Estandarizar procedimientos operativos clave, especialmente en etapas sensibles como la deshidratación, tratamiento térmico y almacenamiento, para minimizar variabilidad y errores humanos.
4. Realizar auditorías internas periódicas tomando como referencia los lineamientos, en caso de que la organización las tenga implementadas, las normas ISO 9001, 14001 y 45001, a fin de verificar que los controles preventivos se mantengan vigentes y eficaces.
5. Reforzar el filtrado y la limpieza del aceite crudo, asegurando la eliminación de impurezas metálicas o catalíticamente activas que puedan inducir reacciones no deseadas.
6. Actualizar el plan HACCP para incluir riesgos relacionados con la polimerización, no solo desde el punto de vista de la inocuidad, sino también como un criterio de calidad fisicoquímica del producto final.
7. Definir e implementar indicadores clave de desempeño (KPI's) relacionados con la prevención de defectos como la polimerización, y establecer metas periódicas que permitan monitorear la eficacia del sistema propuesto.

REFERENCIAS

- [1]. Asociación de la Industria Navarra. (1991). *La calidad en el área de diseño*. Ediciones Diaz de Santos.
- [2]. Besterfield, D. H., Besterfield-Michna, C., Besterfield, G. H., Besterfield-Sacre, M., Urdhwareshe, H., & Urdhwareshe, R. (2011). *Total quality management* (3ª ed.). Pearson.
- [3]. Centro de Formación Empresarial. (s. f.). *Desarrollo de procesos*. Taller de proyectos de procesos: México. Recuperado de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/21/2564Desarrollo%20de%20Procesos.pdf>
- [4]. Comité Nacional Sistema-Producto Oleaginosas. (s.f.). *Proceso de producción del aceite comestible: Desde la extracción hasta el envasado*. Recuperado de: https://www.oleaginosas.org/impr_861.shtml
- [5]. Erickson, D. R. (1995). *Practical handbook of soybean processing and utilization*. AOCS Press.
- [6]. Escalante , E. (2006). *Análisis y mejoramiento de la calidad*. Editorial Limusa.
- [7]. Food and Agriculture Organization. (2021). *Capítulo 5 - Elaboración y refinado de aceites comestibles*. En *Grasas y aceites en la nutrición humana. Consulta FAO/OMS de expertos*. (pp. 39-51). Roma: OMS.
- [8]. Guirette, O., Badillo de Loera, J., Oliván, M., Ortiz, V., & Durán, H. (2021). *Implementación de una herramienta de seguridad alimentaria en empresas de Zacatecas*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94467989006>
- [9]. Gunstone, F. D. (2012). *Fatty Acid and Lipid Chemistry*. Springer.
- [10]. Gunstone, F. D. (2013). *Composition and Properties of Edible Oils. An Edible Oil Processing*. Springer.
- [11]. International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015: Environmental management systems - Requirements with guidance for use*. ISO.
- [12]. International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015: Quality*

management systems - Requirements. ISO.

- [13]. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018: Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use*. ISO.
- [14]. Izar, J. M. (2018). *Calidad y mejora continua*. LID Editorial.
- [15]. Juárez Norma Sammán, M. D. (2007). *El deterioro de los aceites durante la fritura*. Revista Española de Nutrición Comunitaria.
- [16]. Krajewski, L.J. & Ritzman, L. (2000). *Administración de Operaciones, Estrategia y análisis*. (5ª ed.). Pearson Educación.
- [17]. Miranda, F, J., Chamorro, A. & Rubio, S. (2007): *Introducción a la gestión de la calidad*. Delta Publicaciones.
- [18]. Safe Food Alliance Team. (2019). *The History of HACCP*. Recuperado de: <https://safefoodalliance.com/haccp/the-history-of-haccp/>
- [19]. San Miguel, P. (2007). *Calidad 2ª edición*. Ediciones Parainfo.
- [20]. Secretaría de agricultura y desarrollo rural. (2017). *Transformación de aceites, una industria en crecimiento*. gob.mx. Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/transformacion-de-aceites-una-industria-en-crecimiento?idiom=es>
- [21]. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018). *Guía básica para la elaboración de un plan de análisis de peligros y puntos críticos de control para establecimientos TIF*. Dirección general de inocuidad agroalimentaria, avícola y pesquera. México. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/410308/GU_A_B_SICA_DE_ELABORACION_HACCP-compressed.pdf
- [22]. Shahidi, F. (2005). *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (6ª ed.). Wiley-Interscience.
- [23]. Summers, D. (2006). *Administración de la calidad*. Pearson Educación.

Anexo A

A) Paso del proceso	B) Peligro	Fuente	Medidas de control	Punto crítico de control	Límites críticos	Monitoreo				Acciones correctivas	Verificación	Registro
						¿Qué?	¿Cómo?	¿Cuándo?	¿Quién?			
1. Selección y preparación del aceite	F/Q	Contaminantes en aceite crudo	Pruebas iniciales de pureza	Análisis de pureza	Cumplir con especificaciones de calidad	Análisis de cromatografía	Uso de equipo especializado	Antes de iniciar el proceso	Técnico de laboratorio	Retener lotes contaminados y repetir pruebas	Inspección y aprobación de resultados	Registro de análisis iniciales
2. Deshidratación	Q	Oxidación por exposición al aire	Control de temperatura y atmósfera	Temperatura	≤ 120 °C	Temperatura del proceso	Monitoreo con sensores y alarmas	Continuamente durante el proceso	Operador encargado	Detener el proceso y analizar aceites para descartar oxidación	Calibración de sensores	Registro de monitoreo y alarmas
3. Desodorización	F/Q	Exposición prolongada a altas temperaturas y oxígeno	Control de temperatura, presión de vacío y tiempo de exposición	Temperatura y presión	180 - 270 °C, presión <10 mbar, exposición limitada	Sensores y registros del sistema	Monitoreo automático y revisión periódica	Continuamente durante la operación	Personal de control de calidad	Ajustar temperatura, verificar presión de vacío	Revisión de condiciones del sistema y calibración	Registro de temperatura, presión y tiempos
4. Modificación química	Q	Catalizadores y estabilizadores	Dosificación precisa de catalizadores	Dosificación precisa	Variación máxima del 5%	Dosificación de catalizadores	Sistema automatizado con verificación manual	En cada lote	Operador del sistema	Revisar sistema y descartar lotes que no cumplan	Auditoría del sistema de dosificación	Registro de dosificación
5. Enfriamiento	F/Q	Cambios bruscos de temperatura	Control de velocidad de enfriamiento	Temperatura controlada	Enfriamiento gradual	Gradiente de temperatura	Sensores de monitoreo continuo	Durante todo el proceso de enfriamiento	Operador del área	Ajustar gradualmente la velocidad de enfriamiento	Calibración periódica de sensores	Registro de monitoreo de enfriamiento
6. Refinamiento y almacenamiento	Q/B	Contaminación química o microbiana	Condiciones controladas de manejo y almacenamiento	Limpieza y sanitización	Cumplir con normas de limpieza e higiene	Condiciones de limpieza y almacenamiento	Inspección visual y análisis microbiológico	Periódicamente	Responsable de almacén	Implementar limpieza adicional y verificar condiciones nuevamente	Verificación de cumplimiento de normas	Registro de inspecciones y limpieza

Anexo B

No. ACTIVIDAD	RUTINARIO	NO RUTINARIO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN PELIGRO	PSICOACÚSTICA					Capacidad	T	P	what if? (falla)	ACTOS INSEGUROS	FACTORES PERSONALES	FACTORES DE LA EMPRESA	RIESGOS ASOCIADOS (consecuencias)	VALOR DE RIESGO				PRIORIZACIÓN				ACEPTABILIDAD		NOMs	CONTROLES	RESPONSABLE	PERIODICIDAD	INDICADOR	KPI				
					Q	F	B	M	E									V/M/Q	°C	K/cm ²	No.	ND	NE	NC	NR	I	II							III	IV	SI	NO
1	x		Selección y preparación del aceite	Contaminación del aceite crudo	x	x				500 L por lote	N/A	N/A	Pérdida de calidad del producto final	Falta de inspección inicial	Falta de capacitación en control de calidad	Deficiencia en los protocolos de inspección	Producto no apto para consumo	1	8	5	4	160					x		NOM-001-STPS NOM-009-STPS NOM-018-STPS	Implementar inspección inicial y controles de calidad	Técnico de laboratorio	Inspección previa a cada lote	Índice de pureza del aceite crudo	≥ 99% pureza			
2	x		Deshidratación	Fallo en el control de temperatura	x					500 L por lote	150 - 200 °C	1.5 K/cm ²	Descomposición del aceite	Operación sin monitoreo continuo	Falta de capacitación del operador	Mantenimiento deficiente de los equipos	Degradación del producto	2	7	4	5	140				x		NOM-005-STPS NOM-010-STPS NOM-022-STPS	Calibrar y mantener los equipos de temperatura	Operador encargado	Inspección semanal	Eficiencia de deshidratación	≤ 0.05% de humedad residual				
3	x		Desodorización	Formación de compuestos poliméricos por alta temperatura o falla de vacío	x	x				500 - 1000 L por lote	180 - 270 °C	< 0.1 K/cm ²	Formación de polímeros no deseados y pérdida de estabilidad del aceite	Operar sin monitoreo de vacío y temperatura	Desconocimiento de parámetros críticos	Mantenimiento deficiente del sistema de vacío	Formación de compuestos poliméricos no deseados, aumento de viscosidad y pérdida de estabilidad del aceite	3	9	6	3	162				x		NOM-004-STPS NOM-010-STPS NOM-022-STPS	Monitoreo continuo de temperatura, vacío y tiempo de exposición	Personal de control de calidad	Monitoreo continuo por lote	Estabilidad del perfil de ácidos grasos	± 5% del valor objetivo				
4	x		Modificación química	Dosificación incorrecta de catalizadores	x					500 L por lote	100 - 180 °C	1.2 K/cm ²	Producto fuera de la especificación	Uso de medidas aproximadas sin verificación	Falta de entrenamiento en dosificación	Almacenamiento inadecuado de catalizadores	Producto de baja calidad	4	6	5	3	90				x		NOM-010-STPS NOM-018-STPS NOM-022-STPS	Implementar sistemas automáticos de dosificación	Operador del sistema	Verificación diaria	Precisión en la dosificación de catalizadores	± 2% del valor objetivo				
5	x		Enfriamiento	Enfriamiento rápido	x	x				500 L por lote	50 - 100 °C	1.0 K/cm ²	Desestabilización molecular	Introducción abrupta del fluido refrigerante	No seguir procedimientos estándar	Falta de automatización en el control térmico	Producto no estable	5	5	3	4	60				x		NOM-004-STPS NOM-006-STPS NOM-022-STPS	Estandarizar procedimientos de enfriamiento	Operador del área	Inspección mensual	Estabilidad molecular	≥ 95% de consistencia molecular				
6	x		Refinamiento y almacenamiento	Contaminación durante el almacenamiento	x	x				1000 L en tanque de almacenamiento	25 - 40 °C	1.0 K/cm ²	Contaminación del producto	Manipulación sin equipo de protección	Desconocimiento de los procedimientos de higiene	Falta de inspecciones regulares en los tanques	Producto no conforme	6	6	4	2	48				x		NOM-001-STPS NOM-005-STPS NOM-006-STPS NOM-009-STPS	Implementar prácticas adecuadas de almacenamiento	Responsable de almacén	Revisión trimestral	Control de contaminación	≤ 1% de contaminantes				

Anexo C

No.	Actividad	Objetivo	Acciones	KPI's	Meta del KPI	NOMs relacionadas
1	Selección y preparación del aceite	Asegurar la calidad y pureza del aceite crudo	-Implementar inspección inicial y controles de calidad -Capacitar al personal en prácticas de inspección y monitoreo	Índice de pureza del aceite crudo	≥ 99% pureza	NOM-001-STPS NOM-009-STPS NOM-018-STPS
2	Control de temperatura en deshidratación	Garantizar una deshidratación eficiente sin degradar el aceite	-Calibrar y mantener los equipos de temperatura -Implementar monitoreo en tiempo real	Eficiencia de deshidratación (contenido de humedad del aceite postratamiento)	≤ 0.05% de humedad residual	NOM-005-STPS NOM-010-STPS NOM-022-STPS
3	Control del proceso de desodorización	Evitar degradación térmica y compuestos indeseados durante la desodorización	- Implementar monitoreo en tiempo real de temperatura, presión de vacío y tiempo de exposición -Establecer protocolos de operación seguros para condiciones de vacío -Capacitar al personal	Estabilidad del perfil de ácidos grasos	± 5% del valor objetivo	NOM-004-STPS NOM-010-STPS NOM-022-STPS
4	Dosificación controlada en modificación química	Asegurar la dosificación correcta de catalizadores	-Implementar sistemas automáticos de dosificación -Capacitar al personal en sistemas automáticos y precisión en dosificación -Control de calidad en adición de catalizadores	Precisión en la dosificación de catalizadores	± 2% del valor objetivo	NOM-010-STPS NOM-018-STPS NOM-022-STPS
5	Control en el proceso de enfriamiento	Evitar el enfriamiento rápido y asegurar estabilidad del producto	-Estandarizar procedimientos de enfriamiento -Implementar controles automáticos para la tasa de enfriamiento -Capacitar al personal en procedimientos adecuados	Estabilidad molecular	≥ 95% de consistencia molecular	NOM-022-STPS NOM-006-STPS NOM-004-STPS
6	Refinamiento y almacenamiento	Prevenir contaminación del aceite durante el almacenamiento	-Implementar prácticas adecuadas de almacenamiento -Realizar controles de calidad periódicos -Capacitar al personal en almacenamiento seguro	Control de contaminación (índice de contaminantes detectados en almacenamiento)	≤ 1% de contaminantes	NOM-006-STPS NOM-001-STPS NOM-005-STPS NOM-009-STPS