

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Implementación del método de compuestos polares totales (TPM),
para evaluar la calidad del aceite de fritura, en una planta
elaboradora de frituras, en la ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por

Andrea Isabel Cabrera Morataya

para optar al grado de Licenciada en Ingeniería en Ciencias de
Alimentos

Guatemala,

2015

Implementación del método de compuestos polares totales (TPM),
para evaluar la calidad del aceite de fritura, en una planta
elaboradora de frituras, en la ciudad de Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Implementación del método de compuestos polares totales (TPM),
para evaluar la calidad del aceite de fritura, en una planta
elaboradora de frituras, en la ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por

Andrea Isabel Cabrera Morataya

para optar al grado de Licenciada en Ingeniería en Ciencias de
Alimentos

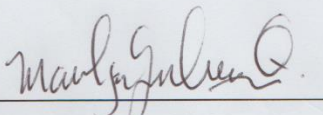
Guatemala,

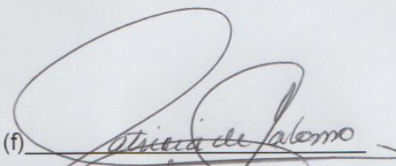
2015

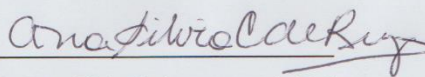
Vo. Bo:

(f) 
Ing. María Isabel Aguilera

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. María Isabel Aguilera

(f) 
MSc. Patricia Palacios de Palomo

(f) 
MSc. Ana Silvia Colmenares de Ruiz

Fecha de aprobación: Guatemala, 02 de Diciembre de 2015.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

A mis padres

A mi directora, Licda. Ana Silvia Colmenares de Ruiz

A mi asesora, Inga. María Isabel Aguilera

A mis amigos, Ing. Francisco López e Inga. Mellany Argueta

A los Auxiliares de Calidad

ÍNDICE

	Página
Lista de cuadros	x
Lista de figuras	xii
Resumen	xiv
I. Introducción.....	1
II. Marco teórico.....	3
A. Estructura química de los lípidos.....	3
B. Aceite de palma	3
C. Proceso de fritura	6
D. El rol del aceite en la fritura de snacks	7
E. Tasa de recambio del aceite	8
F. Reacciones ocurridas en el aceite durante la fritura	8
1. Hidrólisis	9
2. Oxidación	10
3. Polimerización	11
G. Análisis de calidad en aceites	14
1. Determinación de compuestos polares totales	14
2. Determinación de índice de acidez	17
3. Determinación de índice de peróxidos	17
4. Índice de ácido tiobarbitúrico (ATB)	18
H. Normativa de aceites	19

III. Antecedentes	21
IV. Justificación	27
V. Objetivos	30
A. General.....	30
B. Específicos	30
VI. Metodología	31
A. Diseño del experimento uno	31
B. Diseño del experimento dos	31
C. Diseño del experimento tres.....	31
D. Análisis químico del aceite	32
1. Compuestos polares totales	32
2. Índice de acidez	32
3. Índice de peróxidos	33
4. Índice de ácido tiobarbitúrico	34
5. Tratamiento estadístico de los datos	35
VII. Resultados	36
A. Experimento uno	36
B. Experimento dos.....	37
C. Experimento tres	42
VIII. Discusión	47
IX. Conclusiones	62

	Página
X. Recomendaciones	64
XI. Bibliografía	66
XII. Apéndice	72
A. Cuadros y gráficas	72
B. Glosario de términos	81
C. Manual de usuario del equipo Testo 270.....	84

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Composición y propiedades físicas del aceite de palma	5
2. Características del aceite de palma fresco	6
3. Principales grupos de compuestos formados en los aceites y grasas Durante el proceso de fritura	13
4. Clasificación de la calidad del aceite, de acuerdo al porcentaje de compuestos polares totales	16
5. Parámetros de calidad establecidos por regulaciones en países europeos ..	20
6. Parámetros de fritura a utilizar, para los tres tipos de snacks	31
7. TPM, acidez, peróxidos y ATB en 30 muestras de aceite de fritura de snack A, en límite del proceso de fritura	43
8. TPM, acidez, peróxidos y ATB en 30 muestras de aceite de fritura de snack B, en límite del proceso de fritura	44
9. TPM, acidez, peróxidos y ATB en 30 muestras de aceite de fritura de snack C, en límite del proceso de fritura	45
10. Límites recomendados de TPM para uso de aceite de fritura	46
11. TPM con el tiempo de fritura, en aceite de snack A	72
12. TPM, peróxidos y acidez con el tiempo, en muestras de aceite de fritura de snack A	72
13. Coeficientes de correlación de Spearman entre variables (TPM, peróxidos, acidez y ATB), para aceite de fritura de snack A.	73

Cuadro	Página
14. TPM con el tiempo de fritura, en aceite de snack B	73
15. TPM, peróxidos y acidez con el tiempo, en muestras de aceite de fritura de snack B	74
16. Coeficientes de correlación de Spearman entre variables (TPM, peróxidos, acidez y ATB), para aceite de fritura de snack B.	74
17. TPM con el tiempo de fritura, en aceite de snack C	75
18. TPM, peróxidos y acidez con el tiempo, en muestras de aceite de fritura de snack C	75
19. Coeficientes de correlación de Spearman entre variables (TPM, peróxidos, acidez y ATB), para aceite de fritura de snack C.	76
20. Costos de análisis mensual de TPM e índice de acidez	76
21. Factores que influyen en el contenido de TPM durante la fritura.....	77
22. Resultados de índice de ATB en muestras de aceite	80

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Estructura química de un triglicérido	3
2. Diagrama de fruto de palma	4
3. Cambios químicos y físicos ocurridos durante la fritura por inmersión	9
4. Esquema de la reacción de hidrólisis	10
5. Esquema de la reacción de oxidación	11
6. Formación de polímeros acíclicos a partir de ácido oleico, durante la fritura por inmersión	12
7. Reacciones en el aceite durante la fritura	13
8. Esquema de formación de Compuestos Polares Totales durante la fritura	15
9. Representación esquemática de un capacitor	16
10. Reacción entre ácido tiobarbitúrico (ATB) y malonaldehído (MDA).....	19
11. TPM con el tiempo, en aceite de fritura de snack A	36
12. TPM con el tiempo, en aceite de fritura de snack B	37
13. TPM con el tiempo, en aceite de fritura de snack C	37
14. Cambios de TPM con el tiempo, aceite de fritura de snack A	37
15. Cambios de peróxidos con el tiempo, aceite de fritura de snack A	38
16. Cambios de acidez con el tiempo, aceite de fritura de snack A	38
17. Cambios de TPM con el tiempo, aceite de fritura de snack B	39

Figura	Página
18. Cambios de peróxidos con el tiempo, aceite de fritura de snack B	39
19. Cambios de acidez con el tiempo, aceite de fritura de snack B	39
20. Cambios de TPM con el tiempo, aceite de fritura de snack C	40
21. Cambios de peróxidos con el tiempo, aceite de fritura de snack C	40
22. Cambios de acidez con el tiempo, aceite de fritura de snack C	41
23. Índice de peróxidos en aceite de palma (PO), aceite de girasol (SFO), aceite de soya (SBO) y aceite de oliva (OO)	77
24. Cambios en el índice de peróxidos (PV), valor de p-anisidina (AV) y OSI (Oil Stability Index) en aceite de palma durante la fritura continua de papalinas.	78
25. Evolución de parámetros de calidad, durante cinco días de fritura continua en aceite de palma/girasol (40:60 v/v PO/SO), aceite de palma (PO) y de girasol (SO)	78
26. Calidad del aceite de fritura, de acuerdo al contenido de ácidos grasos libres	79
27. Calidad del aceite de fritura, de acuerdo al contenido de compuestos polares totales	79

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación consistió en implementar el método de compuestos polares totales (TPM) para evaluar la calidad del aceite de fritura, en una planta de producción de alimentos tipo boquitas (se referirá a ellos como 'snacks').

Se analizó el aceite de tres snacks (A, B y C) durante la fritura continua, a través de tres experimentos. En el primero, se monitoreó la calidad del aceite al medir los TPM a lo largo del tiempo. En el experimento dos, se realizaron de forma paralela, los análisis de TPM, índice de acidez (FFA, por sus siglas en inglés) e índice de peróxidos. En el último experimento, se evaluó la calidad del aceite en el límite del proceso (previo al descarte) a través de cuatro métodos de calidad (FFA, TPM, análisis de ácido tiobarbitúrico e índice de peróxidos).

Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que en los tres snacks, los TPM incrementan de forma no lineal con el tiempo, alrededor de una tendencia central y que todos los valores de TPM se encuentran, según la literatura, en la categoría de 'aceite fresco', con un 1-14% de TPM (Testo AG, 2014).

En el experimento dos, se observó que el comportamiento de los TPM, FFA e índice de peróxidos varía de un snack a otro al tener distintas condiciones de fritura y materias primas. Además, se encontró que los peróxidos tienen una tendencia oscilante y que no es un método adecuado para evaluar la calidad del aceite durante la fritura continua. Tampoco lo es el análisis de ácido tiobarbitúrico (ATB), ya que la concentración de ácidos grasos poliinsaturados (precursores del malonaldehído, que reacciona en este método) en el aceite de palma es baja.

En el tercer experimento, se encontró que los datos de TPM y FFA en el límite del proceso de fritura no sobrepasan los valores máximos establecidos por la normativa ni la literatura, lo que indica que aun cuando se descarta, el aceite está en buenas condiciones y da un indicio de que se puede extender su vida de uso.

Al hacer un análisis de costos de ambos métodos (FFA y TPM) se obtiene un ahorro utilizando el equipo Testo 270. Sin embargo, más allá del ahorro económico, el mayor beneficio de este equipo es hacer un uso adecuado del aceite de fritura, asegurándose de no descartarlo antes de lo necesario. Por lo tanto, se recomienda sustituir el análisis de acidez por el de TPM para monitorear el aceite durante los primeros 4-5 días de fritura y en el límite del proceso, combinar ambos análisis, con los límites sugeridos en este trabajo de investigación (ver Cuadro 10 en resultados)

I. INTRODUCCIÓN

El proceso de fritura por inmersión es uno de los métodos más populares de preparación de alimentos alrededor del mundo. En este ocurre una transferencia de masa y calor entre el alimento y el aceite, aportándole sabor, olor y textura cuando está frito.

El calentamiento prolongado del aceite de fritura, así como el contacto con el oxígeno del ambiente y humedad del alimento hacen que este se deteriore a través de reacciones como la oxidación, hidrólisis y polimerización, generando compuestos oxidados y polímeros no volátiles que no sólo reducen la calidad y estabilidad del producto, sino que se han asociado con efectos adversos en la salud, como aterosclerosis, diabetes, formación de tumores intestinales, entre otros (Suarterna, 2009).

Actualmente, existen métodos oficiales como el índice de acidez, índice de peróxidos e índice de ácido tiobarbiturico que se aplican al aceite para monitorear su calidad. Sin embargo, algunos de estos pueden ser costosos, laboriosos y no generan los resultados rápidos que requiere la industria para decidir el momento en que el aceite debe ser descartado y evitar problemas de calidad en el producto final.

El método de índice de acidez es uno de los más usados para evaluar la calidad del aceite, siendo en la mayoría de industrias, el único método utilizado. No obstante, en este parámetro solo se considera la degradación hidrolítica, otorgando únicamente información parcial del estado total de deterioro del aceite (Navas, 2007).

La determinación de los compuestos polares totales (de ahora en adelante se hablará de ellos como 'TPM') incluye componentes provenientes de las tres vías principales de degradación de un aceite (aldehídos, cetonas, mono y diglicéridos, entre otros), siendo un resultado más completo de la pérdida de calidad del mismo.

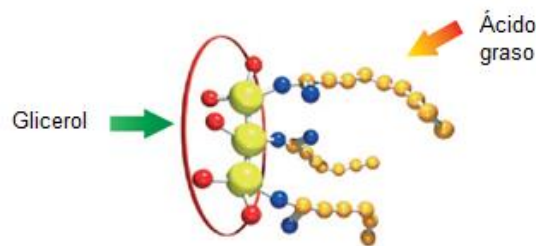
Ante la importancia de monitorear la calidad del aceite de fritura a través de métodos confiables y rápidos, surge la idea de la presente investigación, con el objetivo de implementar el método de medición de TPM utilizando el equipo Testo 270, para evaluar la calidad del aceite de fritura en el proceso de producción en una planta de snacks, así como comparar este análisis con otros métodos de calidad.

II. MARCO TEÓRICO

A. Estructura química de los lípidos

Los lípidos o grasas, son el cuarto grupo principal de macromoléculas presentes en todas las células. Todas las grasas, sean animales o vegetales, tienen la misma estructura química, conocida como triglicérido. Un triglicérido consiste de un esqueleto de glicerol y tres ácidos grasos (cadenas de hidrocarburos), que pueden ser iguales o diferentes entre sí. Los ácidos grasos pueden ser saturados (contienen el mayor número de hidrógenos unidos a sus átomos de carbono) o insaturados (con dobles enlaces entre átomos de carbono) (Testo AG, 2014).

Figura 1. Estructura química de un triglicérido



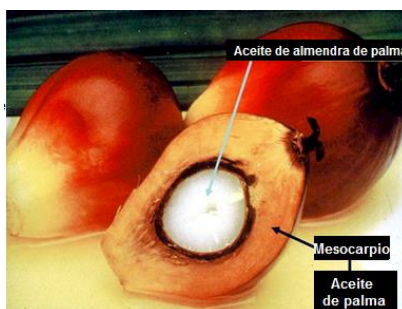
Testo AG, 2014).

Debido a que los enlaces carbono-carbono simples pueden rotar libremente, los ácidos grasos saturados tienen mayor movilidad y se pueden arreglar de forma lineal, lo que hace que este tipo de grasas sea sólida a temperatura ambiente, a diferencia de los insaturados. En general, los aceites (grasas de origen vegetal) son mezclas de ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados. A mayor cantidad de dobles enlaces en un ácido graso, este será más inestable y es más probable que experimente reacciones de degradación (Moreira, 1999).

B. Aceite de palma

El aceite de palma es extraído del mesocarpio del fruto de la semilla de la palma africana *Elaeis guineensis*, que generalmente contiene entre un 45-55% de aceite. Hoy en día, este es el segundo más utilizado en el mundo, ya que tanto el aceite como la oleína de palma muestran excelentes propiedades de fritura, además de que ambos otorgan a los alimentos un sabor deseable (Shahidi, 2005).

Figura 2. Diagrama de fruto de palma



(MPOC, 2012).

El aceite de palma es semi-sólido a temperatura ambiente, y no requiere de hidrogenación para ser utilizado como ingrediente en alimentos. Es rico en carotenoides y tocoferoles, lo que le confiere una estabilidad natural ante la degradación oxidativa. Es posible distinguir dos fracciones en el aceite: la oleína de palma y la estearina de palma (Casimir, 2012).

El aceite de palma difiere de la mayoría de aceites vegetales, al tener altos niveles de ácido palmítico, que alcanzan alrededor de un 44%. En general, contiene aproximadamente un 50% de ácidos grasos saturados, 40% de monoinsaturados y 10% de poliinsaturados (Rincón, 2009).

La producción mundial del aceite de palma incrementó de 15.2 millones de toneladas en 1995, hasta 46.7 millones de toneladas en el 2010. Es un producto de gran importancia en la industria debido a su versatilidad y uso como materia prima en margarinas, helados, emulsificantes, además de su uso en la fritura (Casimir, 2012).

El tipo y composición del aceite son factores determinantes que afectan su estabilidad durante el calentamiento o fritura. Los factores de mayor importancia son la composición de ácidos grasos y la presencia de antioxidantes (Kalogianni, 2009). En estos términos, la industria prefiere utilizar aceites menos insaturados, como lo es el de palma, siendo esta una de las principales razones por las que incursionó en el mercado de las frituras a finales del siglo XX y se han mantenido hasta la actualidad (Zapata, 2014).

Cuadro 1. Composición y propiedades físicas del aceite de palma

Característica	Rango
Gravedad específica (a 50°C)	0.999-0.889
Índice de refracción (a 50°C)	1.455-1.456
Índice de yodo	46-56
OSI (Oxidative Stability Index), 110°C horas	16.6-19.0
Composición de ácidos grasos, %	
C-12:0 Láurico	0.1-1.0
C-14:0 Mirístico	0.9-1.5
C-16:0 Palmítico	41.8-46.8
C-16:1 Palmitoléico	0.1-0.3
C-18:0 Esteárico	4.5-5.1
C-18:1 Oléico	37.3-40.8
C-18:2 Linoléico	9.1-11.0
C-18:3 Linolénico	0.4-0.6
Composición de Triglicéridos, %	
Trisaturados	0.8-9.0
Disaturados	38.5-50.3
Monosaturados	31.8-44.4
Triinsaturados	4.8-9.8
Diglicéridos	3.0-7.6

(Mohamad, N. 2012).

El aceite de fritura comercial más popular es la oleína de palma con puntos de fusión más bajos (22-24 °C), lo que evita la sensación en la boca de cera o grasa en los productos fritos. La principal razón de su uso en este proceso es su alta estabilidad oxidativa, en comparación con otras grasas animales o aceites altamente insaturados (Casimir, 2012).

El deterioro del aceite de fritura generalmente es seguido por cambios en el contenido de ácidos grasos libres, compuestos polares, polímeros, entre otros.

Las características del aceite de palma y la oleína de palma frescos, se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características del aceite de palma fresco.

Parámetro	Aceite de palma	Oleína de palma
Ácidos grasos libres (% en peso)	0.06	0.04
Índice de peróxidos (meq/kg)	4.08	1.49
Índice de yodo	52.0	56.1
Polímeros (% en peso)	0.62	0.47
Compuestos polares (% en peso)	7.96	7.84
Constante dieléctrica	0	0
Punto de humeo	214	216

(Adaptado de Mohamad, 2012)

C. Proceso de fritura

Durante la fritura de los alimentos, el aceite se somete a altas temperaturas en la presencia de agua y aire, lo que lleva a la formación de un número de compuestos, a través de reacciones térmicas, oxidativas e hidrolíticas (Choe, 2007).

A gran escala, la fritura de los alimentos se puede llevar a cabo en un proceso por Batch o en uno continuo. En el primero, se agrega cierta cantidad de alimento a un gran volumen de aceite y después de determinado tiempo, se retira. En la fritura continua, una alimentación constante de producto entra al freidor por un extremo y sale por otro, luego de ser sumergido en el aceite caliente durante un tiempo determinado. En este sistema, se agrega continuamente aceite nuevo con un control automático que mantiene el nivel del tanque. Esto reduce el tiempo de la tasa de recambio y ayuda a disminuir la degradación del aceite (Shahidi, 2005).

La fritura es un proceso complejo que involucra una transferencia simultánea de masa y calor, además de una serie de reacciones químicas. Durante este proceso, el aceite suministra el calor necesario para evaporar la humedad interna del alimento y eliminarla en forma de vapor de agua (Shahidi, 2005).

Además de la pérdida de humedad, el alimento también desarrolla una textura más firme, un color más oscuro y sabores y aromas característicos (Shahidi, 2005).

D. El rol del aceite en la fritura de snacks

El aceite otorga atributos sensoriales deseables durante la fritura, tales como textura, sabor y color. Dentro de los criterios a tomar en cuenta al seleccionar un aceite para fritura industrial se encuentran el costo, la disponibilidad, la vida útil del producto, los requerimientos nutricionales, y las características sensoriales deseables en el alimento (Shahidi, 2005).

Debido a que la calidad del aceite de fritura es uno de los parámetros de mayor importancia al determinar la vida útil de productos de fritura como snacks, es importante monitorear las propiedades del mismo durante su uso. Los límites de calidad dependen del tipo de aceite utilizado y del alimento sometido a fritura. A pesar de que la mayoría de productores de snacks actualmente utilizan sistemas de fritura continuos, que tienen un control del flujo de aceite y filtración automática, se debe monitorear su calidad y mantenerse durante su uso (Man, 2000).

Dentro de los factores que afectan la calidad del aceite se encuentran el tiempo y temperatura de fritura, el tipo de calentamiento, su composición química y la calidad inicial del mismo, la composición del alimento sometido a fritura, el tipo de freidor, la presencia de antioxidantes y la disponibilidad de oxígeno durante el proceso (Choe, 2007).

Debido a que los snacks deben mantener su sabor y textura durante su distribución y venta, los aceites utilizados durante la fritura industrial deben tener una estabilidad aceptable. De igual forma, el costo del aceite es un factor crítico, ya que la mayoría de productos fritos contiene entre un 20-45% del mismo, es importante para la industria minimizar los costos asociados a este ingrediente. Además de esto, el aceite debe cumplir con requisitos tales como tener alta estabilidad oxidativa y ser libre de grasas trans (Shahidi, 2005).

La estabilidad oxidativa es especialmente importante, pues en algunos casos, en el producto frito se pueden desarrollar sabores indeseables durante el almacenamiento, debido a que los productos de la oxidación del aceite son catalizadores y causan una mayor degradación del aceite contenido en el alimento durante el almacenamiento (Shahidi, 2005).

E. Tasa de recambio del aceite

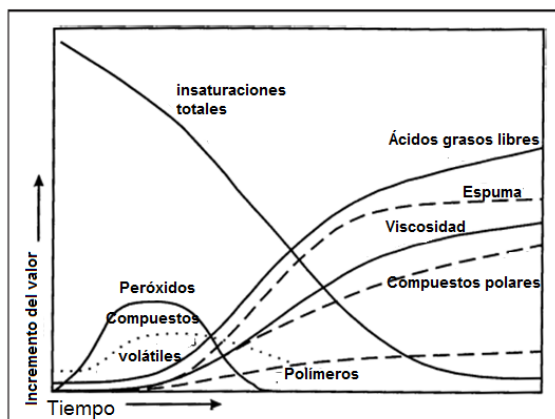
Un factor a considerar en la fritura continua es la tasa de recambio o de reposición del aceite (conocida en inglés como turnover rate). Esta se expresa en horas y se define como la capacidad de aceite del tanque de fritura en relación con el consumo promedio de aceite por hora. A mayor tasa de reemplazo del aceite (menor número de horas), este tendrá un nivel de oscurecimiento más bajo y menor producción de ácidos grasos libres (Boskou, 2010).

La adición frecuente de aceite fresco durante el proceso de fritura por inmersión minimiza los cambios termo-oxidativos y extiende la vida útil del aceite. En operaciones a gran escala de fritura continua, este período generalmente varía entre 5-12 horas, y la degradación de la grasa aún es mínima. Una tasa de recambio alta (por ejemplo, de 5 horas) permite mantener la calidad del aceite bajo la mayoría de condiciones de fritura, mientras que al exceder las 12 horas, se produce una mayor degradación en el aceite (Ghidurus, 2013).

F. Reacciones ocurridas en el aceite durante la fritura

Durante la fritura, el aceite experimenta una serie de reacciones químicas, incluyendo la hidrólisis, oxidación, la polimerización oxidativa y la polimerización térmica. Por otro lado, se dan otras reacciones como la de Maillard, que generan un oscurecimiento en la superficie de la fritura, además de un sabor característico (Shahidi, 2005)

Figura 3. Cambios químicos y físicos ocurridos durante la fritura por inmersión



(Adaptado de Choe, 2007).

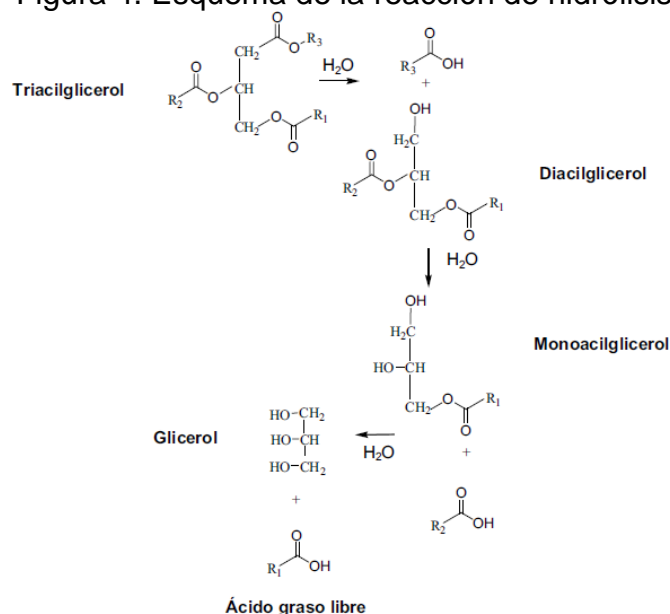
1. Hidrólisis. Cuando un alimento se somete a fritura en aceite caliente, el agua dentro del mismo se evapora, y sale en forma de burbujas de vapor (Choe y Min, 2007). El agua que pierde el alimento forma una capa protectora que previene que el aceite penetre en el producto y simultáneamente permite que se cocine completamente. Durante la hidrólisis, el agua rompe el enlace éster de los triglicéridos y forma di y monoacilgliceroles, glicerol y ácidos grasos libres (EMPORT LLC, fecha desconocida).

Los productos derivados de la hidrólisis aumentan la oxidación al ser más reactivos que los triglicéridos originales. La intensidad de este proceso depende de factores tales como la cantidad de agua en el alimento, la relación superficie/volumen del producto sometido a fritura y la presencia de partículas sólidas residuales, la cual puede acelerar la formación de ácidos grasos libres (EMPORT LLC, fecha desconocida).

La mezcla entre aceite y agua debe ocurrir para que se de esta reacción y debido a que son insolubles entre sí, esto ocurre a muy altas temperaturas (260°C o más) o bien, ante la presencia de un emulsificante durante la fritura. Este emulsificante puede provenir de la descomposición del aceite, de jabón residual al realizar una limpieza inadecuada del equipo o bien, del propio alimento (Shahidi, 2005).

La hidrólisis se da con mayor facilidad en aceites con ácidos grasos insaturados de cadena corta, que en los saturados de cadena larga, ya que los primeros son más solubles en agua que los de cadena larga (Choe, 2007). Los ácidos grasos libres provocan efectos negativos, ya contribuyen al desarrollo de olores y sabores indeseables y alteran el punto de humo del aceite (EMPORT LLC, fecha desconocida). Se conoce como punto de humo a la temperatura a la cual los productos de descomposición del aceite se volatilizan en cantidad suficiente para hacerse visibles (Patrón, 1961).

Figura 4. Esquema de la reacción de hidrólisis



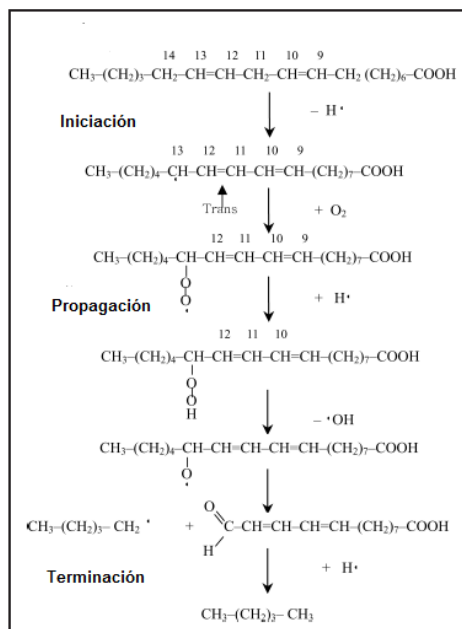
(Blanco, 2006).

2. Oxidación. La oxidación es la forma más común de degradación en las grasas y aceites. Esta es causada por la reacción del oxígeno con los dobles enlaces presentes en las cadenas de ácidos grasos y se divide en dos etapas. Durante la primera (oxidación primaria), se da la formación de hidroperóxidos. Estos compuestos son inestables a altas temperaturas y se descomponen en una mezcla compleja de aldehídos, cetonas, ácidos grasos, entre otros, conocidos como compuestos de oxidación secundarios, que generan olores y sabores indeseables en el producto, como el sabor a rancio y el olor a oxidado (Casimir, 2012).

Debido a que la reacción se da entre el oxígeno y un doble enlace, a mayor contenido de dobles enlaces en la cadena de un triglicérido, menos estable será el aceite. Dentro de los factores que promueven la reacción de oxidación se encuentran:

- Alta temperatura y calentamiento excesivo
- Presencia de oxígeno
- Presencia de metales pro-oxidantes, como cobre y hierro (Casimir, 2012).

Figura 5. Esquema de la reacción de oxidación



(Choe, 2007).

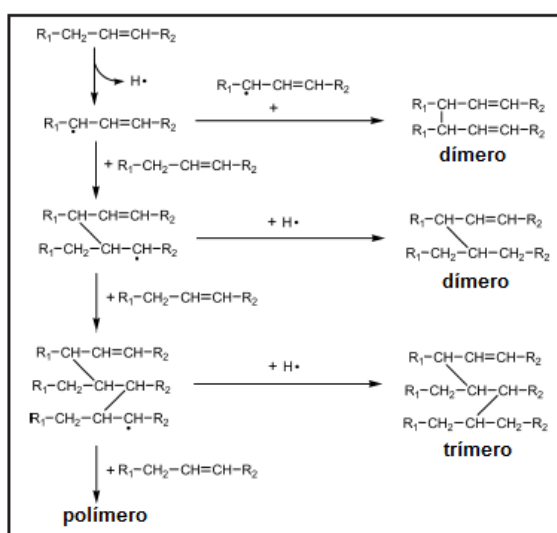
3. Polimerización. Durante la fritura se pueden distinguir dos tipos de polímeros, los oxidativos y los térmicos. Los oxidativos provienen de segmentos de molécula de triacilglicerol liberadas en la oxidación, que reaccionan unas con otras, formando dímeros, trímeros y polímeros. Estos compuestos pueden llegar a generar sabores rancios u oxidados durante el almacenamiento, antes de que acabe la vida útil del producto. Esto sucede debido a que los polímeros oxidativos al descomponerse, pueden liberar radicales libres y oxígeno, que continúan el proceso de oxidación durante el almacenamiento (Shahidi, 2005).

Por otro lado, los polímeros térmicos se forman con el exceso de calor, y pueden ser detectados por panelistas entrenados, ya que generalmente imparten un sabor amargo al producto (Shahidi, 2005).

Los dímeros y polímeros son moléculas grandes con un peso que oscila entre 692 y 1200 Daltons (unidad estándar de masa atómica). La dimerización y polimerización en el aceite de fritura es una reacción de radicales libres. Los polímeros generados durante la reacción pueden ser cíclicos o acíclicos, según el mecanismo de reacción y la composición de ácidos grasos en el aceite (Choe, 2007).

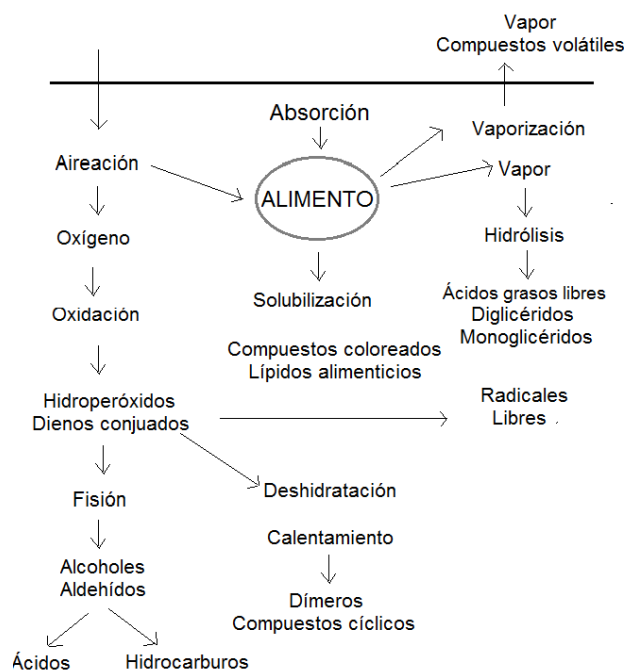
Los polímeros formados en el aceite son ricos en oxígeno, de tal forma que aceleran la reacción de oxidación. Además, estos compuestos aumentan la viscosidad, reducen la transferencia de calor, propician la generación de espuma durante la fritura, y desarrollan colores indeseables en los alimentos. De igual forma, los polímeros causan un incremento en la absorción de aceite del alimento (Choe, 2007).

Figura 6. Formación de polímeros acíclicos a partir de ácido oleico, durante la fritura por inmersión



(Choe, 2007).

Figura 7. Reacciones en el aceite durante la fritura



(Adaptado de Shahidi, 2005).

Cuadro 3. Principales grupos de compuestos formados en los aceites y grasas durante el proceso de fritura

Tipo de alteración	Agente causal	Compuestos generados
Hidrolítica	Agua	Ácidos grasos libres Diacilgliceroles Monoacilgliceroles
Oxidativa	Oxígeno	Monómeros oxidados Dímeros y polímeros oxidados Compuestos volátiles (aldehídos, cetonas, hidrocarburos, etc.)
Térmica	Temperatura	Dímeros y polímeros

(Adaptado de Navas, 2005).

G. Análisis de calidad en aceites

Las reacciones de hidrólisis, oxidación y polimerización generan una serie de cambios en el aceite durante la fritura, incluyendo la producción de compuestos volátiles y no volátiles. La mayoría de los compuestos volátiles se evaporan al ambiente junto al vapor de agua, pero los compuestos no volátiles experimentan reacciones químicas posteriores o bien, son absorbidos por los alimentos (Choe, 2007).

Dichos compuestos no volátiles provocan cambios físicos y químicos en el aceite, incluyendo una disminución de los ácidos grasos insaturados y aumento en el color, viscosidad, densidad y contenido de ácidos grasos libres, compuestos polares y polímeros (Choe, 2007). Existe una variedad de criterios y técnicas de análisis para evaluar la calidad de los aceites durante la fritura y establecer el momento en que estos deben descartarse.

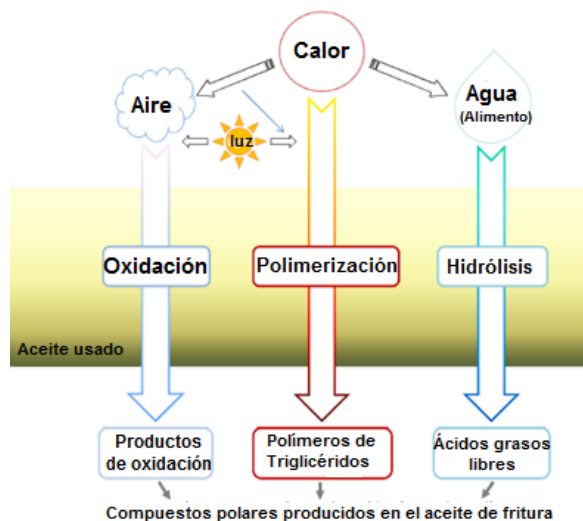
Dentro de los métodos más utilizados se puede mencionar el índice de acidez, índice de refracción, índice de peróxidos, valor de yodo, índice de anisidina, valor de ácido tiobarbitúrico y compuestos polares totales (EMPORT LLC, fecha desconocida).

1. Determinación de compuestos polares totales. Las complejas reacciones que ocurren en el aceite durante la fritura modifican su composición química, liberando ácidos grasos libres y radicales libres que se combinan para formar monoglicéridos, diglicéridos y polímeros de triglicéridos, además de aldehídos, cetonas y otros componentes conocidos en conjunto como 'compuestos polares totales', o TPM por sus siglas en inglés (total polar molecules) (EMPORT LLC, fecha desconocida).

Estos, además de tener un impacto negativo en las características sensoriales de los alimentos, tienen consecuencias en la salud humana, pues no son digeribles y pueden provocar enfermedades cardíacas y gastrointestinales. Por lo tanto, el monitoreo constante de los TPM permitirá no sólo mantener la calidad del

aceite y del producto, sino evitar daños en la salud del consumidor (EMPORT LLC, fecha desconocida).

Figura 8. Esquema de formación de compuestos polares totales durante la fritura



(EMPORT LLC, fecha desconocida).

Los compuestos polares totales (TPM) afectan la consistencia y apariencia de la grasa, además de la calidad del producto frito. Un alimento que sea sometido a fritura en un aceite degradado forma rápidamente una costra oscura y absorbe grandes cantidades de grasa. Esto, ya que en el aceite con alto contenido de TPM, el agua escapa más rápidamente a través de la grasa y el producto se seca más rápido. Como resultado de la rápida pérdida de agua, la grasa entra en contacto con la superficie del alimento por un mayor período de tiempo. La consecuencia de ello es que más grasa entra al producto y al estar expuesta su superficie por un mayor período de tiempo, existe más posibilidad de oscurecimiento (Testo AG, 2014).

La determinación de TPM en aceites es un método bien aceptado por su precisión y reproducibilidad. Una ventaja de medir los TPM es que ofrece la posibilidad de mantener, a través de un monitoreo regular de estas moléculas, el rango óptimo de calidad del aceite durante la fritura (14-20% de TPM) (Testo AG, 2014).

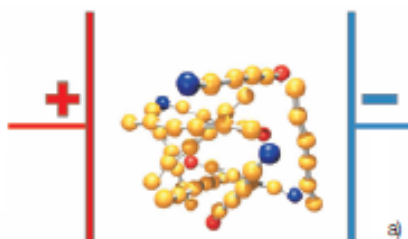
Cuadro 4. Clasificación de la calidad del aceite, de acuerdo al porcentaje de compuestos polares totales

Porcentaje de compuestos polares totales	Clasificación del aceite
1-14%	Aceite fresco
14-18%	Ligeramente usado
18-22%	Usado, pero aún aceptable
22-24%	Altamente usado, cambiar el aceite
>24%*	No debe utilizarse

*El máximo permisible de compuestos polares totales depende de la legislación de cada país (adaptado de Testo AG, 2014).

Los TPM pueden ser cuantificados a través de cromatografía de columna o bien, por medio de la medición de la constante dieléctrica. Uno de los equipos comerciales disponibles actualmente es el Testo 270 y utiliza este principio. Un voltaje se conecta a ambos lados de la placa del capacitor (placas azul y roja en la Figura 5), y estas se cargan hasta alcanzar cierto valor de carga eléctrica. A medida que la carga incrementa, los compuestos polares de la grasa se alinean y generan un cambio en la capacitancia que luego se convierte a porcentaje de compuestos polares totales (Testo AG, 2014).

Figura 9. Representación esquemática de un capacitor



(Testo AG, 2014).

2. Determinación de Índice de acidez. Los ácidos grasos libres (FFA, por sus siglas en inglés, free fatty acids) se producen por la hidrólisis de los aceites y grasas. El nivel de FFA depende del tiempo, temperatura y contenido de humedad con el que está en contacto el aceite durante el almacenamiento y procesamiento. Debido a que los FFA son menos estables que el aceite neutro, son más propensos a oxidarse y generar rancidez. Por esta razón, el contenido de ácidos grasos libres es un factor relevante asociado a la calidad y valor comercial de los aceites (Mahesar, 2014)

Los métodos utilizados en la actualidad para medir los FFA son avalados por la AOAC (Association of Analytical Communities) y la AOCS, y se basan en una titulación, en donde el aceite o grasa se disuelve en etanol o una mezcla de etanol y éter dietílico, utilizando fenolftaleína como indicador. Los resultados son reportados en miligramos de ácido por gramo de aceite. Sin embargo, este procedimiento es laborioso y requiere grandes cantidades de químicos y solventes, de tal forma que el costo de los reactivos y las cuestiones ambientales tienden a limitar este método (Mahesar, 2014).

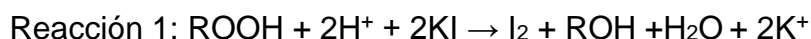
De igual forma, la detección precisa del punto final de la titulación, especialmente para los aceites altamente coloreados, es una tarea difícil, ya que se pueden introducir errores al no identificar correctamente el punto de viraje del indicador. Sin embargo, a pesar de las desventajas, el método de titulación se sigue utilizando en una gran cantidad de industrias para determinar el contenido de ácidos grasos libres, como indicador de calidad (Mahesar, 2014).

3. Determinación de índice de peróxidos. La oxidación de lípidos involucra la formación continua de hidroperóxidos como compuestos primarios de la oxidación que pueden descomponerse en una variedad de compuestos secundarios volátiles y no volátiles. La tasa de formación de hidroperóxidos excede su tasa de descomposición durante las etapas iniciales de la oxidación, y esto se invierte en las etapas posteriores. Por esta razón, el índice de peróxidos es un indicador de las etapas iniciales de la oxidación del aceite (Shahidi, 2005).

Sin embargo, es posible evaluar si la concentración de hidroperóxidos en un aceite se encuentra en la etapa de crecimiento o bien de decaimiento, al medir este índice en función del tiempo (Shahidi, 2005).

El índice de peróxidos representa el contenido total de hidroperóxidos y es uno de los indicadores de calidad más utilizados en grasas y aceites durante la producción y almacenamiento. Un gran número de métodos se ha desarrollado para encontrar el índice de peróxidos, incluyendo la titulación yodométrica. Este análisis se basa en la oxidación del ion yoduro por hidroperóxidos (ROOH) (Shahidi, 2005).

En el método de índice de peróxidos, una solución saturada de yoduro de potasio se añade a las muestras de aceite para reaccionar con los hidroperóxidos. El yodo liberado, se titula con tiosulfato de sodio y se utiliza almidón como indicador colorimétrico. El índice de peróxidos se obtiene calculando los miliequivalentes de oxígeno por kilogramo de muestra (Shahidi, 2005). La reacción es la siguiente:



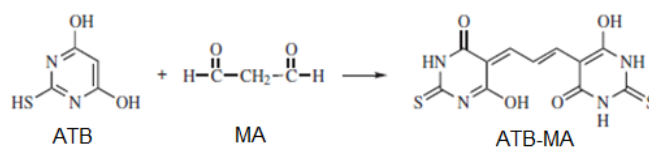
(Shahidi, 2005).

4. Índice de ácido tiobarbitúrico (ATB). El método del ATB es uno de los más utilizados para evaluar el deterioro oxidativo de alimentos que contienen grasa, incluyendo grasas y aceites animales y vegetales, ácidos grasos y sus ésteres y materiales similares (Shahidi, F. 2005).

Durante la oxidación de lípidos, el malonaldehído, un componente de los ácidos grasos con 3 o más dobles enlaces, se forma como resultado de la degradación de ácidos grasos poliinsaturados. Usualmente se utiliza como indicador del proceso de oxidación de lípidos, al reaccionar con ácido tiobarbitúrico (ATB) para formar un compuesto rosado que se mide por espectrofotometría en su máximo de absorción a 530-535 nm (Shahidi, 2005).

El grado de oxidación se reporta como valor de ATB y se expresa en miligramos de malonaldehído equivalentes por kilogramo de muestra o como micromoles de malonaldehído equivalentes por gramo de muestra. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que otros compuestos como cetonas, ácidos, esterés, pirimidinas, etc. también pueden reaccionar con el ATB y generar un color rosado, causando una sobreestimación de la absorbancia. Por esta razón, actualmente se utiliza el término 'sustancias reactivas al ATB', en vez de malonaldehído. A pesar de sus limitaciones, el método provee un resultado aceptable para evaluar la oxidación de lípidos en los alimentos (Shahidi, 2005).

Figura 10. Reacción entre ácido tiobarbitúrico (ATB) y malonaldehído (MDA)



(Shahidi, 2005).

H. Normativa de aceites

Debido a que la calidad de los alimentos se ve influenciada por el aceite de fritura, es importante establecer límites que garanticen la producción de alimentos fritos de alta calidad (Marmesat, 2007).

En Guatemala, la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) no ha emitido una norma que regule los parámetros de calidad en aceite de fritura. En la norma del Codex Alimentarius para Grasas y Aceites Comestibles (CODEX STAN 19-1981), se establecen algunos límites para que este alimento sea apto para el consumo humano. Estos incluyen el índice de peróxido, que puede llegar a ser de hasta 10 miliequivalentes de oxígeno activo/kg de aceite y el índice de acidez, con un límite de 0,6 mg de KOH/g de aceite, para aceites refinados.

El FDA (Food and Drug Administration) tampoco ha establecido directrices para controlar la calidad de aceites de fritura. En cuanto al nivel de TPM en aceites de fritura, muy pocos países alrededor del mundo tienen regulaciones nacionales.

A pesar de que no existe una legislación europea al respecto, algunos países miembros de la Unión Europea tienen normas nacionales que establecen un nivel de 25% de TPM, mientras que otros permiten hasta un 27% (Wai, 2007).

En cuanto al límite máximo del análisis de ácido tiobarbitúrico, este no se contempla en la normativa consultada, sin embargo, Shater reporta que el máximo permisible es de 0.90 mg de malonaldehído (MDA) por kilogramo de muestra (Shater, 2012) y IUPAC reporta valores de hasta 0.47 mg MDA/kg en aceites (IUPAC, 1989).

En el Cuadro 5 se resumen algunas de las regulaciones de países europeos, en cuanto al uso de aceite de fritura.

Cuadro 5. Parámetros de calidad establecidos por regulaciones en países europeos.

	Austria	Bélgica	Francia	Alemania	Italia	Países Bajos	Portugal
Temperatura máxima de fritura (°C)	180	180	180		180		180
Punto de humeo (°C)	170			170			
Ácidos grasos libres (% máximo)		2.5					
Compuestos polares (% máximo)	27		25	25	25		25
Ácidos grasos oxidados (% máximo)	1			0.7			
Dímeros y polímeros (% máximo)		25				16	

(Adaptado de Goodburn, K. 2001)

III. ANTECEDENTES

Hoy en día, las frituras son consumidas en grandes cantidades alrededor del mundo. Ante su creciente demanda, es de suma importancia para la industria el monitorear la calidad de los aceites de fritura, debido a su cantidad de uso y elevado costo. Además de influir en las propiedades organolépticas del producto final, ya que conforma entre un 20-45% en peso del mismo, puede generar compuestos dañinos para la salud humana durante su degradación (Shahidi, 2005).

Existen varios métodos para monitorear la calidad del aceite, sin embargo, muchos de ellos presentan la desventaja de ser costosos, sujetos a errores introducidos por el experimentador o bien requieren de largos períodos de tiempo, de tal forma que la industria busca alternativas más simples y rápidas. Ejemplo de ello es el estudio realizado por Chen, 2013, en el que se evaluaron los compuestos polares totales y el índice de acidez, por medio de métodos estándar y métodos rápidos.

En el estudio, se realizó una fritura por Batch durante 48 h, utilizando dos tipos de aceite (de soya y de palma) y tres productos (papas fritas, filete de pierna de pollo y chuleta de cerdo). El monitoreo del aceite usando métodos rápidos se llevó a cabo con dos equipos de medición de TPM (FOM 310 y Testo 270), y un equipo de índice de acidez (3M Shortening Monitor). Por otro lado, los TPM se midieron a través del método oficial de la AOCS (American Oil Chemists' Society) y se usó el método estándar del índice de acidez, titulando con KOH.

Los TPM aumentaron linealmente con el tiempo y la medición del Testo 270 fue similar a la del método estándar, siendo esta una buena opción para evaluar la calidad del aceite durante la fritura. Por otro lado, el tipo de alimento no tuvo ningún efecto sobre el contenido de TPM e índice de acidez, ya que todos tenían un contenido de agua y de grasa similar. Mientras que el tipo de aceite si influyó, al ser la tasa de formación de TPM en el aceite de palma menor que en el de soya (Chen, 2013).

En cuanto a la correlación entre métodos, hubo una alta correlación lineal entre los métodos estándar y los métodos rápidos al medir los TPM, de tal forma que estos últimos son una buena alternativa. Chen indica que en varios estudios reportados en la literatura se ha encontrado una baja correlación entre los TPM y el índice de acidez en aceite usado (Chen, 2013).

Otros autores también han evaluado el uso de métodos rápidos para determinar la calidad del aceite de fritura. Ejemplo de ello es el estudio realizado por Marmesat, 2007, en el que se analizaron 105 muestras de aceite para cuantificar los TPM, por el método estándar de IUPAC y a través de dos equipos comerciales (Fritest y Oxifritest).

Los resultados de los equipos rápidos, que se basan en una reacción colorimétrica, tuvieron coeficientes de correlación altos con los compuestos polares totales. Sin embargo, los autores argumentan que al realizar este análisis se debe tomar en cuenta el objetivo del uso de métodos rápidos.

Si el principal objetivo es obtener información acerca del momento en el cual el aceite debe ser descartado, tomando en cuenta los límites de TPM establecidos en la regulación, no es esencial una alta correlación en todo el rango de TPM, siendo de mayor importancia lo que sucede alrededor del punto de rechazo (14-20% de TPM).

Cížková, 2011, también implementó un método rápido para evaluar la calidad del aceite de fritura. Los análisis seleccionados fueron la medición de compuestos polares totales a través del equipo Testo 265 (un modelo anterior al Testo 270) y los ácidos grasos libres por medio de 3M LRSM. Los resultados de los métodos rápidos se compararon con los de los métodos estándar (cromatografía en columna y titulación, respectivamente), al monitorear la calidad de aceite de canola durante la fritura de papas fritas.

La correlación entre los métodos estándar y los rápidos fue cercana a 1 en ambos casos (coeficiente de 0.93 para el índice de acidez y 0.87 para TPM), de tal forma que estos métodos pueden reemplazar a los de referencia, para evaluar

la calidad del aceite de fritura. Cabe mencionar que los autores hacen hincapié en el hecho de que los ácidos grasos libres y los TPM son grupos de compuestos con distinta estructura y origen, y su incremento indica un estado de degradación distinto (Cížková, 2011).

Otros investigadores también han utilizado el equipo Testo para evaluar los compuestos polares totales durante la degradación del aceite. Flores-Álvarez, 2012, condujo un estudio con una mezcla de aceite (oleína de palma y canola, con 200 ppm de antioxidante TBHQ) en el que midió ácidos grasos libres, índice de peróxido, TPM, entre otros análisis. Luego de medir los TPM utilizando el método oficial IUPAC, no se encontró diferencia significativa al resultado de Testo 270, por lo que se usó este instrumento.

Al evaluar el efecto de 48 horas de fritura de Nuggets de pescado y papas fritas en el contenido de ácidos grasos libres del aceite, el mismo autor encontró que estos incrementaron con el tiempo, sin exceder el límite permitido por la regulación (1.0-1.3 mg ácido/g muestra). El índice de peróxidos también aumentó, al ser estos un indicador de la oxidación primaria del aceite (Flores-Álvarez, 2012).

En cuanto al contenido inicial de TPM, fue similar al reportado en la literatura para oleína de palma (6.24%). Este valor es alto, dado su elevada concentración de diglicéridos. El contenido de TPM aumentó rápidamente durante los primeros 4 días, y siguió en aumento hasta el día doce, cuando se sobrepasó el porcentaje máximo aceptado (25%-27%, dependiendo del país).

En otro estudio, Yilmaz, 2011, cuantificó los TPM en 28 muestras de aceite de fritura en restaurantes, utilizando el Testo 265. Se empleó este análisis debido a que resultados previos obtenidos por el autor, demostraron que esta técnica está bien relacionada con el método oficial basado en cromatografía. Además, reporta que este es un análisis rápido y económico de aplicar para los propósitos regulares de inspección. De las muestras evaluadas, sólo tres sobrepasaron el límite de la normativa local (25% de TPM máximo).

Varios estudios han analizado los cambios en el aceite durante la fritura. Enrique-Fernández, 2011, determinó que la degradación del aceite está relacionada con un incremento en los compuestos polares totales. La medición del porcentaje de TPM se llevó a cabo utilizando un método rápido, con el equipo FOM 310, que se basa en la determinación de la constante dieléctrica. Entre los análisis realizados también se encontraban el índice de acidez y de peróxidos.

El análisis de TPM reveló que los aceites estaban bajo el límite máximo establecido por la regulación (rango que varía entre un 25-27%, dependiendo del país) y que este parámetro es un indicador importante, ya que se refiere a todos los productos de degradación. En el caso de los peróxidos, estos incrementaron hasta alcanzar un valor máximo, seguido de un decrecimiento debido a que se degradan en otros compuestos, como aldehídos, cetonas y otros componentes secundarios derivados de la oxidación. A pesar de que los ácidos grasos libres también aumentaron como resultado de la rancidez hidrolítica, todos los valores estaban bajo el límite establecido para descartar aceite usado (1.0-1.3 mg ácido/g muestra).

En la investigación llevada a cabo por Kalogianni, 2009, se cuantificaron los compuestos polares totales a través de la cromatografía de exclusión por tamaño a alta presión (HPESC), para evaluar el efecto de la adición de patatas en la degradación de aceite de palma, al compararlo con un control que únicamente tenía aceite caliente. Además del porcentaje de TPM, se determinaron los productos de polimerización.

Las mediciones demostraron que el calentamiento aumentó la concentración de TPM en el aceite y que la adición de producto al aceite de fritura también tiene un efecto en el incremento de TPM, esto era de esperarse, ya que el producto alimenticio interactúa con la grasa, lo que promueve reacciones de degradación durante la fritura.

Cabe mencionar que el análisis cromatográfico del aceite reveló una ausencia de ácidos grasos libres, de tal manera que no se generaron productos de descomposición de la hidrólisis bajo las condiciones experimentales utilizadas. En

este sentido, el autor hace énfasis en que, a pesar de que algunos estudios experimentales han reportado incremento en los productos de hidrólisis durante la fritura, otros no han detectado un aumento (Kalogianni, 2009).

Otro aspecto importante es que al comparar la concentración de compuestos de polimerización en la fracción polar y en el aceite completo, se encontraron diferencias. Esto demuestra que no todos los productos de polimerización son parte de la fracción polar, de tal forma que al utilizar el análisis de la fracción polar para determinar el contenido total de polímeros, se puede obtener una subestimación del mismo.

En otra investigación, Ali, 2014, monitoreó la calidad de aceite de canola durante un proceso discontinuo de fritura de Nuggets de pollo durante 24 horas, evaluando parámetros como el índice de peróxidos, ácidos grasos libres y TPM, este último a través del método estandarizado IUPAC. En este, los ácidos grasos libres sí aumentaron con el tiempo de fritura, siendo así un indicador de la rancidez hidrolítica. Sin embargo, los autores señalan que no es recomendado utilizar este análisis como el único indicador para descartar aceites usados.

En cuanto al índice de peróxidos, se encontraron resultados similares a los de Enrique-Fernández, en donde este valor aumentó hasta alcanzar un máximo, después del cuál disminuyó, debido a que los compuestos de oxidación primaria se degradaron en otros de oxidación secundaria. Aun así, se superaron los límites permisibles máximos de peróxidos (10 meq O₂/kg). Además, el contenido de compuestos polares totales incrementó con el tiempo y superó ligeramente el límite máximo.

Bolourian, 2011, monitoreó la calidad de una mezcla de aceite de palma y canola, durante la fritura de papas, durante cinco días consecutivos a 180°C. Las propiedades fisicoquímicas medidas fueron ácidos grasos libres, índice de peróxidos y compuestos polares totales, este último por el método oficial IUPAC.

En este estudio, el índice de peróxidos tuvo un gran incremento durante el primer día de fritura, pero permaneció relativamente constante los días

consecutivos. Los TPM aumentaron linealmente durante la fritura, mientras que el porcentaje de ácidos grasos libres también incrementó con el tiempo.

El método de índice de acidez es uno de los más utilizados para evaluar la calidad del aceite, de hecho, en algunas industrias es el único método utilizado. Sin embargo, este parámetro toma en cuenta únicamente la degradación hidrolítica, otorgando solamente información parcial del estado total de deterioro del mismo. Por esta razón, Navas evaluó en 2007 la implementación de métodos rápidos y simples, complementarios a la determinación de acidez en aceite, durante la fritura continua, en tres fábricas de snacks de España.

Los parámetros evaluados en el estudio fueron viscosidad, constante dieléctrica, índice de yodo, índice de acidez, valor de p-anisidina, determinación del ácido tiobarbitúrico, contenido de polímeros, absorción UV de lípidos y compuestos polares (a través del método Oxifrit). Este último, se basa en una reacción con los compuestos de alteración y tiene una escala de color que marca el aceite como 'bueno', 'todavía está bien', 'reemplazar' y 'malo'.

Los autores encontraron que el método del ATB no tenía suficiente sensibilidad para diferenciar entre muestras de aceite con diferente grado de oxidación. El método Oxifrit fue descartado para evaluar la alteración del mismo, ya que todas las muestras analizadas indicaban que era 'bueno'. Se encontró que la absorción UV a longitudes de onda de 232, 279 y 280 nm son medidas adecuadas para monitorear la oxidación en el aceite. De igual forma, los análisis de p-anisidina y contenido de polímeros, son capaces de discriminar entre muestras con distintos grados de oxidación. Las mediciones de índice de acidez y constante dieléctrica también incrementan al utilizar el aceite.

Debido a que los resultados de este estudio relevaron que existía una buena correlación entre el método de índice de acidez y las otras variables de calidad (absorción UV, valor de p-anisidina y porcentaje de polímeros), la combinación del índice de acidez junto a estos métodos otorga información adicional acerca de la degradación oxidativa, lo que permitiría tener un control más preciso y eficiente del aceite de fritura.

IV. JUSTIFICACIÓN

A pesar de ser una de las formas más antiguas de procesar alimentos, los productos fritos siguen siendo populares y altamente cotizados por los consumidores, debido a sus propiedades organolépticas y conveniencia.

En el 2005, se estimaba que la industria de frituras en los Estados Unidos tenía un valor de 83 billones de dólares, y al menos el doble en el resto del mundo. Para el 2011, los snacks a base de papa, tortilla, nueces y otros generaron un total de ventas de 18.8 billones de dólares en Estados Unidos. En Guatemala, también se ha observado un crecimiento en este mercado, al aumentar el consumo de snacks fritos en un 17% del año 2002 al 2007 (Escobar, 2012).

La transferencia simultánea de masa y calor que ocurre entre el alimento y el aceite, le otorga propiedades características a las frituras, tales como su sabor, color y textura (Choe, 2007). Aunque el proceso de fritura genera cambios deseables en los alimentos, al utilizar el aceite de forma continua a altas temperaturas, está sujeto a reacciones de degradación durante las que se generan compuestos de descomposición con un efecto negativo en la calidad del producto.

Estos componentes provenientes de la degradación disminuyen la vida útil, al generar sabores y olores rancios durante el almacenamiento y también han sido asociados a daños en la salud, pues aldehídos, componentes carbonílicos y algunos polímeros y monómeros de ácidos grasos cíclicos pueden causar alteraciones gastrointestinales, retardo en el crecimiento, aterosclerosis y la formación de tumores en el intestino (Suarterna, 2009).

Por esta razón, es de gran relevancia para la industria el conocer los límites en los que el aceite de fritura debe ser reemplazado. Estos se determinan con base en niveles de productos de deterioro específicos. Los análisis de calidad incluyen la medición de propiedades físicas (viscosidad, color, consistencia, etc.) y químicas (índice de peróxidos, índice de acidez, índice de yodo, valor de p-anisidina, determinación del ácido tiobarbitúrico, compuestos polares totales, entre otros).

Sin embargo, algunos presentan el inconveniente de ser difíciles de implementar, laboriosos, tienen elevado costo o bien se necesita de personal con alta capacidad técnica.

Aunque la industria de snacks mide los ácidos grasos libres como un indicador de la estabilidad y calidad del aceite, cada vez más empresas se convencen que la medición de los compuestos polares totales podría ser el mejor índice de calidad.

Los ácidos grasos libres son productos primarios de la degradación hidrolítica de los triglicéridos durante la fritura. Sin embargo, el porcentaje de ácidos grasos libres no está relacionado de forma lineal con la degradación del aceite, de tal forma que no debería ser el único índice de calidad empleado. Esto es debido a que, factores como el calor, la luz, la oxidación y otros, provocan que los ácidos grasos libres se conviertan en otros compuestos polares (Moreira, 1999).

De igual forma, la detección exacta del punto final de la titulación es subjetiva y por lo tanto está sujeta a errores introducidos por el experimentador, al no identificar correctamente el punto de viraje del indicador (Mahesar, 2014).

Los compuestos polares totales conforman todos los subproductos que se forman cuando un triglicérido es modificado por el proceso de fritura y están regulados por la normativa en países como España, Francia, Italia y otros, que permiten un máximo del 25% de TPM (Suarterna, 2009). Actualmente, marcas como Merck, 3M y Testo ofrecen equipos que permiten medir este parámetro con gran rapidez y precisión.

Conociendo la importancia de monitorear la calidad en el aceite de fritura, así como de aplicar métodos que permitan obtener resultados rápidos en la industria, este trabajo de investigación tiene como objetivo implementar un método rápido para evaluar la calidad del aceite en una industria de snacks de Guatemala, a través del equipo Testo 270, sustituyendo el índice de análisis de acidez.

En este estudio se determinarán los valores máximos de TPM que se alcanzan durante la fritura continua de tres snacks y se evaluará el estado de degradación del aceite en combinación con otros métodos (índice de peróxido, índice de acidez e índice de ácido tiobarbitúrico), para asegurarse que los resultados propuestos por el equipo Testo son confiables.

V. OBJETIVOS:

A. General:

Implementar el método de medición de Compuestos Polares Totales (TPM) para evaluar la calidad del aceite de fritura utilizado en el proceso de producción en una planta de frituras.

B. Específicos:

1. Medir el contenido de compuestos polares totales, índice de peróxidos e índice de acidez a lo largo del proceso de fritura de tres tipos de snacks.
2. Evaluar la calidad del aceite de fritura en el límite del proceso de tres tipos de snacks, a través de cuatro análisis de calidad y comprobar que los resultados se encuentran bajo los límites máximos permisibles.
3. Comparar entre sí los resultados de los diferentes análisis de calidad y determinar la correlación estadística entre ellos.
4. Establecer los beneficios generados al implementar el análisis de TPM utilizando el equipo Testo 270.

VI. METODOLOGÍA

La fritura se realizará en tres productos: A (fritura de maíz), B (expandido frito de maíz) y C (fritura de trigo), con los parámetros de fritura reportados en el cuadro seis. Dada la configuración del freidor de la fritura de maíz (snack A), el aceite se filtrará continuamente sólo en este equipo.

Cuadro 6. Parámetros de fritura a utilizar, para los tres tipos de snacks

Snack	Tiempo de fritura	Temperatura de fritura	Flujo promedio de alimentación	Capacidad del tanque de aceite	Acidez máxima permitida en aceite (mg ácido palmítico/g muestra)
A	27	180°C	500-700 kg/h	350 gal	0.25
B	46	180°C	210 kg/h	150 gal	0.60
C	12	190°C	490 kg/h	100 gal	0.20

A. Diseño del experimento uno

Se medirán los TPM a lo largo de la fritura, en los tres tipos de snacks. Para esto, se tomarán muestras de 50 mililitros de aceite durante cinco días y se realizarán los análisis en triplicado.

B. Diseño del experimento dos

Se tomarán muestras de aceite a lo largo de la fritura continua de los snacks y se medirán los compuestos polares totales, peróxidos y porcentaje de acidez. Los análisis de TPM y acidez se realizarán en triplicado, y los de peróxidos, en duplicado. Las muestras se almacenarán en frascos ámbar y en refrigeración (5°C) previo al análisis de peróxidos.

C. Diseño del experimento tres

Se tomará un total de 30 muestras de 100 mililitros de aceite cercano al límite máximo de acidez permitido (muestras con acidez de 15-25% en peso para A, 45-60% para B y de 9-20% para C).

Las 30 muestras serán tomadas por producto y se realizarán los análisis de acidez, compuestos polares totales y ácido tiobarbitúrico, en triplicado y de peróxidos, en duplicado. Las muestras serán almacenadas a 5°C en frascos ámbar, previo a los análisis de peróxidos e índice de ácido tiobarbitúrico.

D. Análisis químico del aceite

1. Compuestos polares totales. El porcentaje de TPM se medirá utilizando el equipo Testo 270, calibrado con el aceite de referencia Testo 0554 2650. Se colocarán 50 mL de aceite en un Beaker de 250 mL y se hará la lectura sumergiendo el equipo en el aceite hasta que no exista variación en los datos de la pantalla (aproximadamente 20 segundos).

2. Índice de acidez. Se realizará a través de una titulación con indicador de fenolftaleína. Se pesarán 20 gramos de muestra en una balanza con precisión de ± 0.05 g, en un Beaker de 250 mL y se disolverá en 50 mL de etanol (previamente neutralizado, al mezclar con 3 gotas de fenolftaleína y agregar NaOH 0.1 N, hasta que aparezca una tonalidad rosada). Luego de adicionar 3 gotas de fenolftaleína (10 g/l de solución en 95% v/v de etanol) Se titulará con agitación y calor (60°C), con hidróxido de sodio 0.1 N, hasta el punto de viraje del indicador (el color rosado de la fenolftaleína debe persistir al menos 30 segundos). El índice de acidez se reportará en miligramos de ácido palmítico por gramo de muestra y se calculará de la siguiente forma:

$$\frac{\text{mg ácido palmítico}}{\text{g muestra}} = \frac{(A-B) \times N \times 25.6}{W}$$

En donde:

A= volumen (mL), del estándar de álcali utilizado en la titulación

B=volumen (L), utilizados en la titulación del blanco

N=Normalidad de la solución de álcali

W= masa de la muestra (g).

3. Índice de peróxido. Medición del índice de peróxido, modificación del método Oficial AOAC 965.33

a. Reactivos:

- 1) Solución de tiosulfato de sodio 0.01 M: disolver 2.48 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en 1 L de agua. Hervir 5 minutos y transferir, mientras está caliente, a un recipiente limpio. Almacenar la solución en un lugar oscuro.
- 2) Solución de ácido acético y cloroformo: mezclar 3 volúmenes de CH_3COOH con 2 volúmenes de CHCl_3 .
- 3) Solución saturada de yoduro de potasio: Disolver un exceso de KI en agua hervida. Debe quedar un exceso sólido. Almacenar en la oscuridad.

b. Titulación: se pesarán 2.5 ± 0.05 g de aceite en un Erlenmeyer de 250 mL. Agregar 15 mL $\text{CH}_3\text{COOH}-\text{CHCl}_3$, agitar para disolver. Agregar 0.25 mL de solución saturada de yoduro de potasio, dejarlo reposar durante 10 minutos, agregar 15 mL de agua y 0.25 mL de solución saturada de almidón y agitar. Titular lentamente con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.01 M agitando vigorosamente hasta que el azul desaparezca.

c. Elaboración de blanco: se realizará un blanco para restar la porción de la titulación. El volumen consumido deberá ser menor de 0.1 mL de tiosulfato de sodio 0.1 M.

$$\text{Índice de peróxido } \left(\frac{\text{mg peróxido}}{\text{kg aceite}} \right) = \frac{S \times M \times 1000}{g \text{ muestra}}$$

En donde:

S= mL de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (con corrección de blanco)

M= molaridad de la solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

4. Índice de ácido tiobarbitúrico. Determinación de ATB por el método IUPAC 2.531

a. Reactivos:

- 1) 1-butanol puro, con un contenido de agua menor al 0.5%
- 2) Solución de ácido 2-tiobarbitúrico: se prepara disolviendo 200 mg de ácido 2-tiobarbitúrico en 100 mL de 1-butanol. Dejar la cantidad pesada con butanol durante la noche o utilizar una centrífuga para remover el residuo sin disolver.

Llevar el filtrado a 100 mL con 1-butanol, el reactivo no debe almacenarse por más de 1 semana en el refrigerador.

- ##### b. Determinación espectrofotométrica:
- se pesará 50-200 mg de muestra en un balón de 25 mL y se disolverá con una pequeña cantidad de 1-butanol, para luego aforar. Se transferirá, utilizando una pipeta de 5 mL, este volumen de muestra a un tubo seco (diámetro interno 10-15 mm). Se agregarán 5 mL de la solución de ATB y se agitará. Se colocará el tubo en un baño termostático a 95°C. Luego de 120 minutos, se removerá el tubo del baño termostático y se enfriará bajo el grifo durante 10 minutos, hasta que alcance la temperatura ambiente. Luego, se medirá la absorbancia de la solución de ATB en una celda de 10 mm, a 530 nm y se utilizará como blanco, esta determinación no debe exceder la absorbancia 0.1.

c. Expresión de resultados:

$$ATB = \frac{50 \times (A-B)}{m}$$

En donde:

A= absorbancia de la muestra

B= absorbancia del blanco

m= masa de la muestra (mg)

50=Es un factor válido si el volumen del balón es 25 mL y la longitud de la celda es 10 mm.

5. Tratamiento estadístico de los datos. Las mediciones de los análisis realizados en triplicado o duplicado, se presentarán como promedios, con su respectiva desviación estándar.

Para el experimento 1, se obtendrá la correlación entre los TPM y el tiempo, en todos los tipos de snack, con el tiempo como variable independiente y los TPM como la variable dependiente. También se determinará el coeficiente de determinación (R^2).

Para el experimento 2 se realizará una gráfica de cada análisis de calidad (índice de peróxidos, índice de acidez y TPM) versus tiempo, para cada uno de los snacks evaluados, con el tiempo como variable independiente y los otros parámetros, como variables dependientes. También se obtendrá la correlación (el coeficiente R^2) entre los TPM y el tiempo, y entre la acidez y el tiempo, para todos los snacks.

Para el experimento 3, se examinará la correlación entre las variables medidas (índice de acidez, índice de peróxidos, valor de ácido tiobarbitúrico y compuestos polares totales), a través de un coeficiente de correlación de Spearman.

VII. RESULTADOS

A. Experimento uno

En la figura once se muestra la variación de TPM con el tiempo, durante la fritura continua del snack A. El coeficiente de correlación es relativamente bajo ($R^2=0.6809$), demostrando que estas variables no tienen una correlación lineal.

En la figura doce se presentan los mismos resultados para el aceite de fritura del snack B. En este también se tiene un coeficiente de correlación de Pearson bajo ($R^2=0.424$). En comparación con la figura once los TPM muestran una mayor estabilidad con el tiempo para este snack (con un comportamiento casi horizontal), variando ligeramente alrededor de una tendencia central.

La relación de TPM con el tiempo de fritura del snack C no es lineal ($R^2=0.064$), ya que los compuestos polares totales en el aceite tienden a mostrar un comportamiento oscilante (ver Figura 13). Similar a lo que ocurre con el snack B, los compuestos polares totales oscilan alrededor de una tendencia central.

Figura 11. TPM con el tiempo, en aceite de fritura de snack A

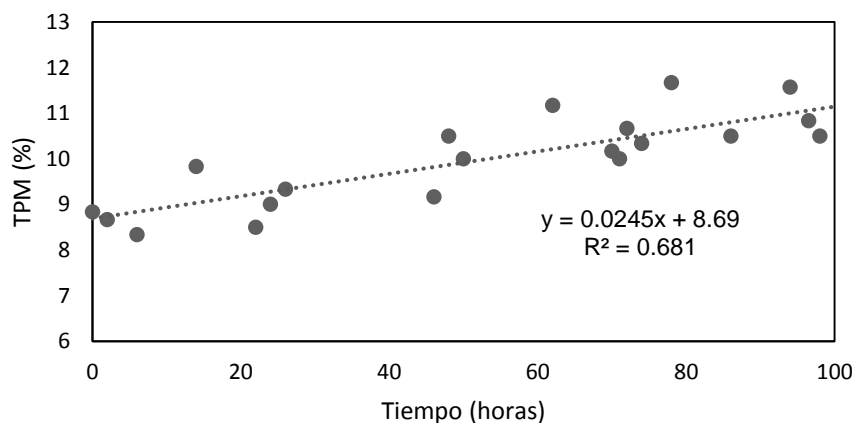


Figura 12. TPM con el tiempo, en aceite de fritura de snack B

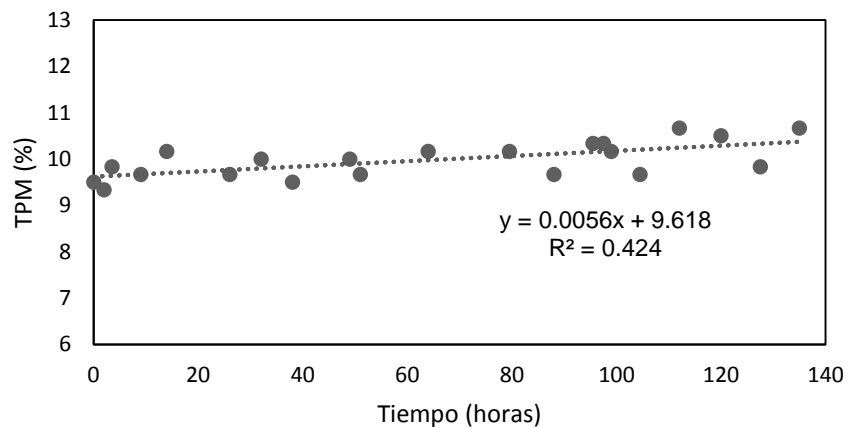
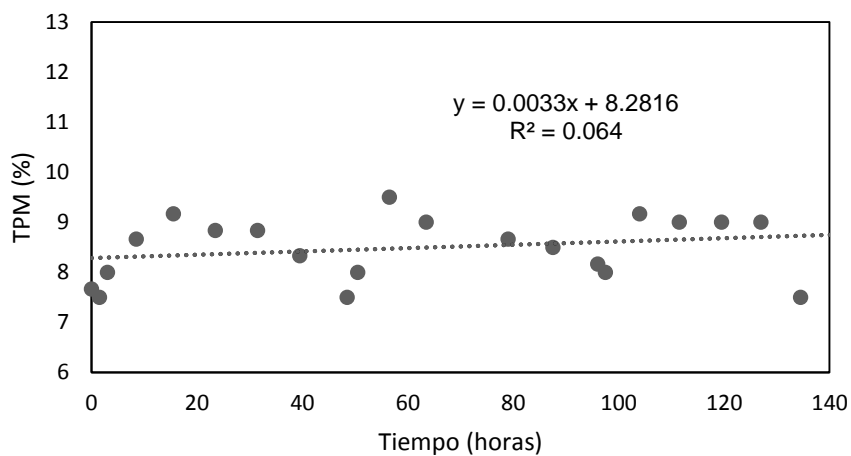


Figura 13. TPM con el tiempo, en aceite de fritura de snack C



B. Experimento dos

Figura 14. Cambios de TPM con el tiempo, aceite de fritura de snack A

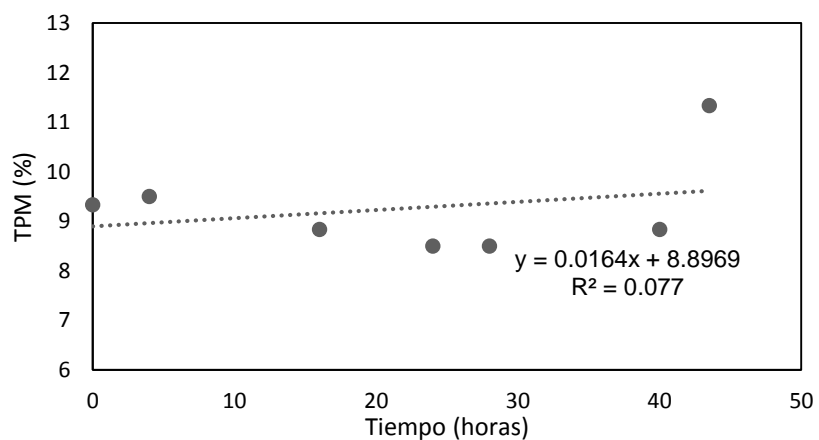


Figura 15. Cambios de peróxidos con el tiempo, aceite de fritura de snack A

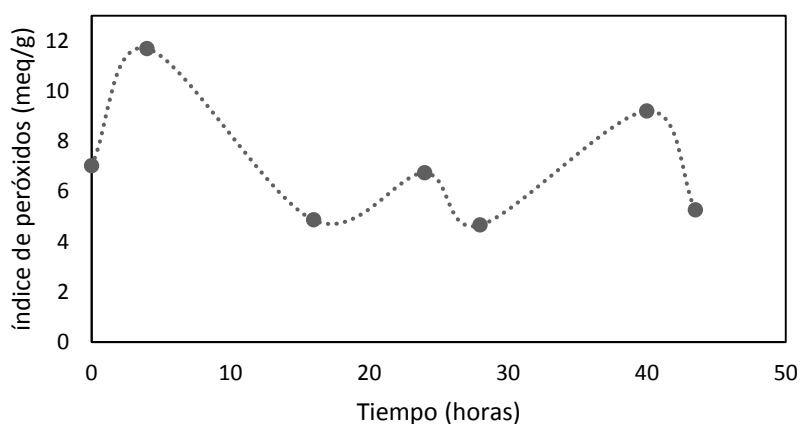
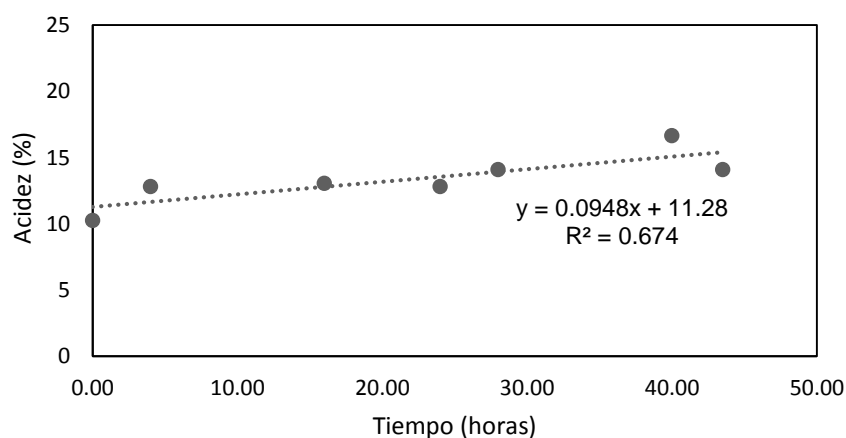


Figura 16. Cambios de acidez con el tiempo, aceite de fritura de snack A



En las figuras 14-16 se muestran los resultados de TPM, peróxidos y acidez, medidos en siete muestras de aceite de snack A, durante 44 horas de fritura continua. Los TPM tienden a disminuir alrededor de las 24 horas, para luego aumentar nuevamente (Figura 14). Los compuestos polares totales tienen una baja correlación con el tiempo ($R^2 = 0.077$).

Los peróxidos tienen una tendencia oscilante, como se puede observar en la Figura 15, que muestra varios picos y valles. El porcentaje de acidez en el aceite tiende a aumentar con el tiempo, cuyo comportamiento es más lineal que el de los TPM ($R^2=0.674$).

Figura 17. Cambios de TPM con el tiempo, aceite de fritura de snack B

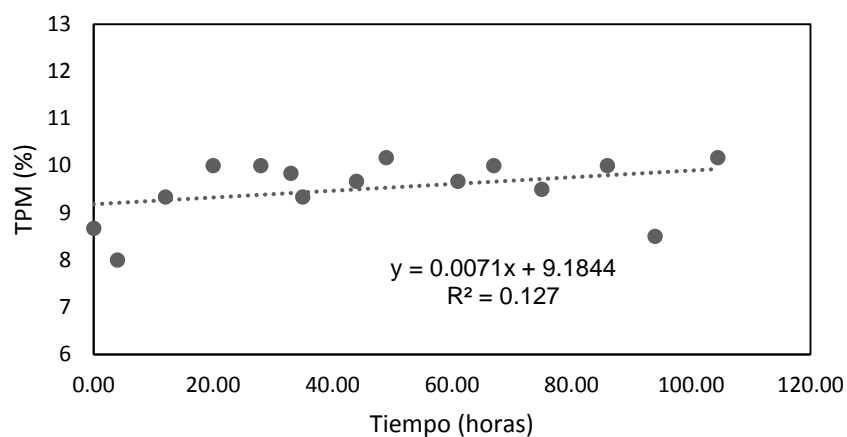


Figura 18. Cambios de peróxidos con el tiempo, aceite de fritura de snack B

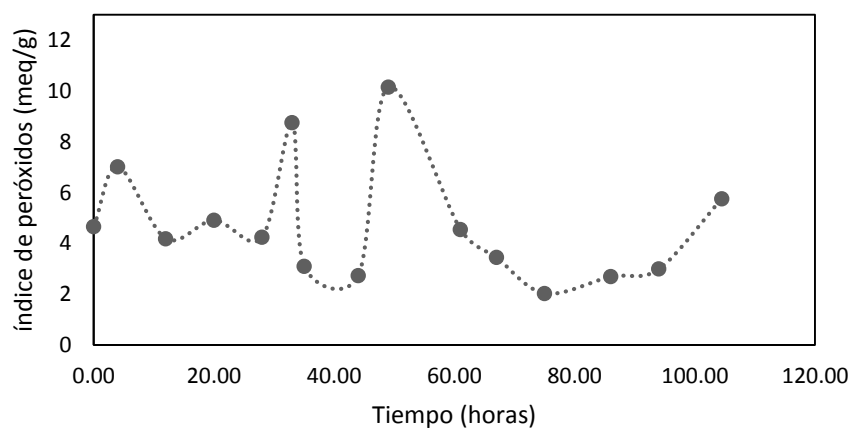
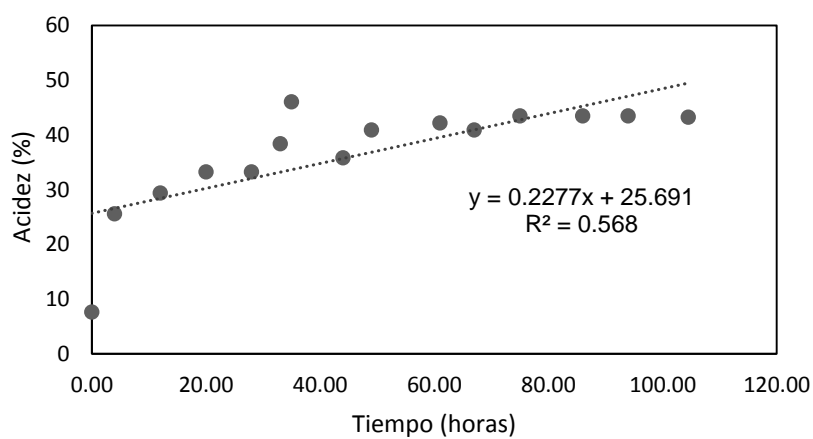


Figura 19. Cambios de acidez con el tiempo, aceite de fritura de snack B



Las figuras 17-19 presentan los resultados del experimento dos, al analizar 15 muestras de aceite de fritura de snack B, tomadas durante 105 horas. Tanto los compuestos polares totales, como los peróxidos, tienden a oscilar con el tiempo, con una menor variabilidad en los TPM (Figura 17). La tendencia de los compuestos polares totales es creciente con el tiempo.

El porcentaje de acidez en el aceite también muestra una tendencia creciente con el tiempo, con un coeficiente de correlación ($R^2=0.568$) mayor que el de los compuestos polares totales ($R^2=0.127$).

Figura 20. Cambios de TPM con el tiempo, aceite de fritura de snack C

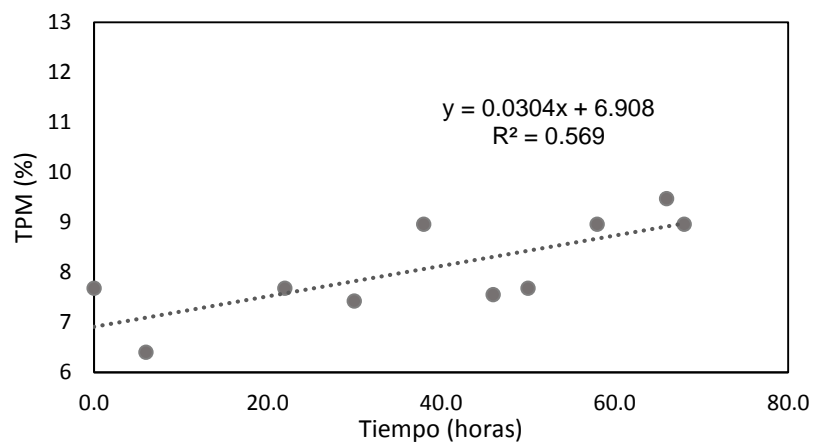


Figura 21. Cambios de peróxidos con el tiempo, aceite de fritura de snack C

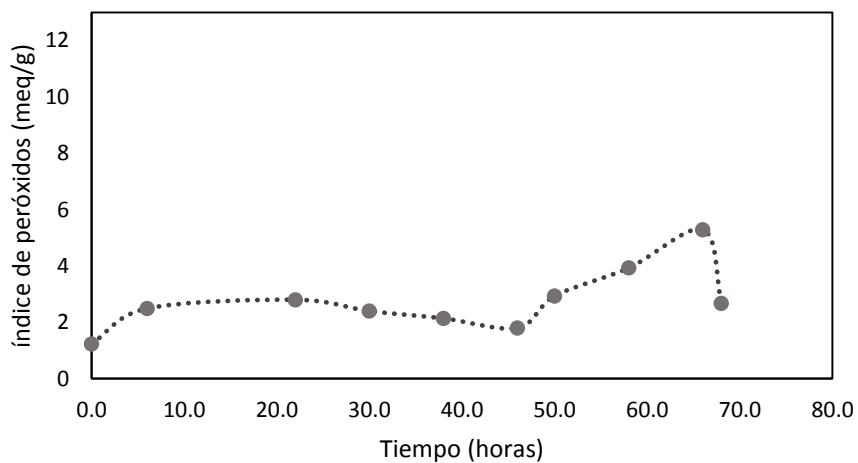
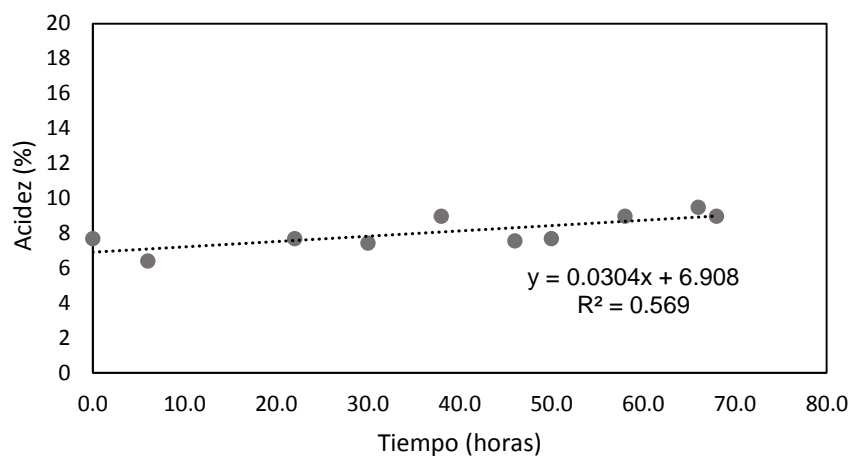


Figura 22. Cambios de acidez con el tiempo, aceite de fritura de snack C



En las figuras 20-22 se muestran los datos medidos en 10 muestras de aceite de fritura de snack C, durante 68 horas de fritura. Semejante a lo que sucede con los otros snacks, los TPM no guardan una relación lineal con el tiempo durante la fritura (Figura 20). El comportamiento de los peróxidos es similar al observado durante la fritura de los snacks A y B. La acidez aumenta levemente con el tiempo, con un coeficiente de correlación de $R^2=0.569$.

Para todos los snacks, los valores de acidez medidos están dentro del límite del proceso establecido por la industria estudiada (25% para A, 60% para B y 20% para C).

C. Experimento tres

En el cuadro siete se presentan los datos de TPM, acidez, peróxidos y ATB medidos en 30 muestras de aceite, con acidez entre 15-25% (en los límites del proceso). Los compuestos polares totales se mantienen en un rango de 10.7-13.8% ('aceite fresco', según Testo AG, 2014), mientras que los peróxidos varían en un intervalo más amplio (3.91-11.50 meq/g). Las sustancias reactivas al malonaldehído (análisis de ATB) se cuantificaron en cantidades bajas, del orden de 10^{-2} mg MDA/kg muestra.

Los mismos resultados para el aceite de fritura del snack B (acidez 45-60%), se muestran en el cuadro ocho. Los valores de TPM oscilan entre 10.0-15.4, encontrándose en la clasificación de 'aceite ligeramente usado' (Testo AG, 2014).

Los peróxidos se encuentran entre 1.27-9.87, con un promedio de 3.63 meq O_2 /kg de muestra. El análisis de ATB fue en promedio de $0.77 \pm 0.36 \times 10^{-2}$ mg MDA/kg de muestra.

Todas las muestras de aceite de fritura del snack C tuvieron valores de TPM dentro del rango que la literatura clasifica como 'aceite fresco' (Testo AG, 2014), con un promedio de $9.4 \pm 0.8\%$. El valor de la acidez promedio se encuentra por debajo del límite máximo permisible establecido por la empresa ($10.3 \pm 1.6\%$), mientras que los peróxidos varían en un rango muy amplio de 1.70- 13.73 meq O_2 /kg de muestra. El valor promedio del índice de ATB fue de $0.41 \pm 0.33 \times 10^{-2}$ mg MDA/kg, siendo la concentración de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico baja en este aceite.

Cuadro 7. TPM, acidez, peróxidos y ATB en 30 muestras de aceite de fritura de snack A, en límite del proceso de fritura.

Muestra	TPM (%)	Acidez (%)	Peróxidos (meq O ₂ /kg)	ATB (X10 ⁻² mg MDA/kg)
1	11.0 ± 0.0	21.3 ± 1.5	7.67 ± 0.27	0.17 ± 0.04
2	11.2 ± 0.3	23.0 ± 2.6	7.98 ± 2.45	1.24 ± 0.62
3	10.8 ± 0.3	21.3 ± 1.5	6.21 ± 2.27	0.32 ± 0.07
4	11.0 ± 0.5	23.0 ± 2.6	6.96 ± 0.82	0.31 ± 0.05
5	12.0 ± 0.5	22.2 ± 3.0	6.73 ± 2.10	0.65 ± 0.61
6	11.3 ± 0.6	18.8 ± 1.5	4.85 ± 0.90	1.29 ± 0.53
7	11.7 ± 0.3	15.2 ± 1.5	5.57 ± 0.05	0.97 ± 0.04
8	11.0 ± 0.0	15.4 ± 0.0	6.19 ± 1.48	0.88 ± 0.36
9	13.2 ± 0.3	16.2 ± 1.5	5.65 ± 1.38	4.38 ± 0.56
10	12.2 ± 0.3	15.9 ± 1.0	4.01 ± 0.80	2.91 ± 0.27
11	11.0 ± 0.0	15.4 ± 0.0	4.60 ± 1.79	0.39 ± 0.02
12	13.0 ± 0.0	15.0 ± 1.5	4.66 ± 0.24	1.31 ± 0.16
13	13.5 ± 0.0	18.8 ± 3.0	5.34 ± 0.81	0.59 ± 0.20
14	12.2 ± 0.3	18.3 ± 0.7	4.53 ± 0.52	1.58 ± 0.96
15	11.2 ± 0.3	18.8 ± 1.5	5.32 ± 0.28	0.36 ± 0.16
16	12.3 ± 0.3	21.3 ± 1.5	3.91 ± 0.83	
17	11.7 ± 0.3	19.6 ± 1.5	11.49 ± 1.37	
18	12.2 ± 0.3	17.5 ± 0.7	5.50 ± 1.17	
19	13.3 ± 0.3	18.8 ± 1.5	6.43 ± 1.56	
20	12.0 ± 0.0	18.3 ± 0.7	7.16 ± 0.02	
21	13.8 ± 0.3	23.0 ± 2.6	5.90 ± 1.60	
22	12.2 ± 0.3	17.9 ± 0.0	10.73 ± 0.33	
23	12.5 ± 0.0	15.4 ± 0.0	7.30 ± 1.66	
24	10.7 ± 0.0	16.2 ± 1.5	4.88 ± 2.30	
25	11.0 ± 0.3	15.1 ± 1.5	9.72 ± 1.14	
26	11.5 ± 0.0	17.9 ± 0.0	4.20 ± 0.89	
27	12.7 ± 0.3	17.1 ± 1.5	9.78 ± 1.33	
28	13.2 ± 0.3	20.5 ± 0.0	13.97 ± 1.19	
29	11.5 ± 0.0	16.6 ± 1.3	5.68 ± 2.11	
30	11.5 ± 0.0	23.1 ± 0.1	11.50 ± 0.69	
Promedio	12.0 ± 0.9	18.7 ± 2.8	7.40 ± 4.12	1.16 ± 1.13

Cuadro 8. TPM, acidez, peróxidos y ATB en 30 muestras de aceite de fritura de snack B, en límite del proceso de fritura.

Muestra	TPM (%)	Acidez (%)	Peróxidos (meq O ₂ /kg)	ATB (X10 ⁻² mg MDA/kg)
1	10.7 ± 0.3	57.2 ± 3.9	2.53 ± 0.23	0.79 ± 0.39
2	10.7 ± 0.3	55.5 ± 1.5	1.47 ± 0.42	1.18 ± 0.48
3	10.0 ± 0.0	48.6 ± 4.1	2.05 ± 0.41	1.41 ± 0.29
4	10.7 ± 0.3	52.1 ± 1.5	1.27 ± 0.19	1.67 ± 0.42
5	10.2 ± 0.3	47.8 ± 1.5	2.21 ± 0.58	0.51 ± 0.16
6	11.0 ± 0.0	49.5 ± 1.4	2.31 ± 0.95	0.52 ± 0.16
7	14.9 ± 0.0	51.8 ± 1.5	5.48 ± 2.02	0.69 ± 0.18
8	14.2 ± 0.3	49.0 ± 1.7	2.24 ± 0.33	0.59 ± 0.10
9	14.5 ± 0.3	50.1 ± 0.6	2.65 ± 0.45	0.62 ± 0.22
10	14.8 ± 0.3	51.4 ± 0.7	2.96 ± 0.93	0.75 ± 0.10
11	14.7 ± 0.5	50.7 ± 0.0	2.66 ± 0.32	0.69 ± 0.11
12	15.0 ± 0.0	52.0 ± 1.3	2.19 ± 0.12	0.61 ± 0.19
13	15.4 ± 0.3	53.4 ± 0.4	2.11 ± 0.92	0.62 ± 0.13
14	15.1 ± 0.0	52.6 ± 0.7	3.23 ± 0.74	0.45 ± 0.11
15	15.2 ± 0.0	52.8 ± 3.1	3.18 ± 0.10	0.52 ± 0.08
16	14.9 ± 0.3	51.5 ± 1.5	2.77 ± 0.66	
17	14.5 ± 0.3	50.1 ± 1.9	3.63 ± 0.36	
18	14.4 ± 0.6	49.6 ± 1.4	6.07 ± 1.10	
19	14.3 ± 0.3	49.4 ± 0.9	3.99 ± 0.74	
20	13.9 ± 0.0	47.7 ± 0.0	6.15 ± 1.21	
21	13.7 ± 0.0	47.2 ± 1.8	3.65 ± 0.26	
22	14.2 ± 0.0	49.0 ± 1.3	3.84 ± 0.08	
23	14.3 ± 0.3	49.4 ± 0.4	4.81 ± 0.99	
24	13.7 ± 0.0	47.1 ± 0.6	5.92 ± 0.97	
25	14.4 ± 0.0	49.6 ± 0.6	2.91 ± 0.58	
26	14.0 ± 0.3	48.4 ± 0.6	6.14 ± 1.12	
27	14.3 ± 0.0	49.2 ± 0.8	9.86 ± 1.07	
28	13.7 ± 0.3	47.0 ± 1.2	2.79 ± 0.17	
29	14.5 ± 0.3	50.0 ± 1.6	5.06 ± 0.46	
30	14.0 ± 0.0	48.3 ± 0.6	2.79 ± 0.17	
Promedio	13.7 ± 1.7	50.3 ± 2.4	3.63 ± 1.9	0.77 ± 0.36

Cuadro 9. TPM, acidez, peróxidos y ATB en 30 muestras de aceite de fritura de snack C, en límite del proceso de fritura.

Muestra	TPM (%)	Acidez (%)	Peróxidos (meq O ₂ /kg)	ATB (X10 ⁻² mg MDA/kg)
1	9.0 ± 0.5	11.9 ± 1.5	3.03 ± 1.06	0.78 ± 0.14
2	9.0 ± 0.0	11.9 ± 1.5	3.16 ± 1.68	0.74 ± 0.20
3	8.7 ± 0.3	11.1 ± 1.5	1.70 ± 0.29	1.10 ± 0.24
4	8.7 ± 0.3	11.1 ± 1.5	1.96 ± 0.56	0.67 ± 0.05
5	9.7 ± 0.3	9.0 ± 1.5	11.01 ± 0.32	0.24 ± 0.14
6	10.0 ± 0.0	9.0 ± 0.7	4.16 ± 2.12	0.72 ± 0.23
7	8.7 ± 0.3	10.4 ± 0.3	5.45 ± 1.16	0.13 ± 0.04
8	9.2 ± 0.3	9.8 ± 0.7	10.09 ± 1.04	0.13 ± 0.02
9	8.8 ± 0.3	9.8 ± 0.7	7.61 ± 1.76	0.03 ± 0.01
10	9.0 ± 0.5	9.4 ± 0.7	4.46 ± 0.84	0.28 ± 0.03
11	9.5 ± 0.0	10.2 ± 0.0	13.73 ± 1.19	0.38 ± 0.13
12	9.0 ± 0.0	9.4 ± 0.7	3.21 ± 0.28	0.09 ± 0.06
13	9.2 ± 0.3	9.4 ± 1.5	3.19 ± 0.13	0.30 ± 0.10
14	9.5 ± 0.0	9.5 ± 0.7	4.37 ± 0.20	0.05 ± 0.02
15	10.7 ± 0.3	9.3 ± 0.8	2.59 ± 0.30	0.48 ± 0.17
16	10.7 ± 0.3	15.8 ± 2.0	4.65 ± 0.86	
17	10.2 ± 0.3	13.7 ± 1.5	5.65 ± 1.14	
18	9.0 ± 0.0	10.7 ± 0.7	5.14 ± 0.41	
19	10.0 ± 0.5	9.0 ± 1.3	4.17 ± 0.44	
20	11.7 ± 0.3	11.9 ± 1.5	1.76 ± 0.32	
21	9.8 ± 0.3	10.2 ± 0.1	4.16 ± 0.42	
22	10.3 ± 0.3	10.2 ± 0.3	5.22 ± 0.58	
23	8.2 ± 0.3	9.4 ± 0.7	3.93 ± 0.25	
24	8.7 ± 0.3	9.1 ± 0.3	5.29 ± 0.32	
25	9.0 ± 0.5	9.4 ± 0.7	2.68 ± 0.10	
26	9.8 ± 0.6	11.3 ± 1.3	3.53 ± 0.27	
27	9.7 ± 0.3	9.6 ± 0.6	7.24 ± 1.75	
28	9.7 ± 0.3	9.8 ± 0.5	4.74 ± 0.30	
29	9.4 ± 0.0	10.5 ± 0.7	3.83 ± 0.11	
30	8.8 ± 0.3	9.0 ± 1.3	4.19 ± 1.35	
Promedio	9.4 ± 0.8	10.3 ± 1.6	4.86 ± 2.72	0.41 ± 0.33

Cuadro 10. Límites recomendados de TPM para uso de aceite de fritura

Snack	Límite de TPM para combinar con acidez	Límite máximo de TPM
A	11	13
B	12.5	14.5
C	10	12

VIII. DISCUSIÓN

El objetivo del experimento uno fue medir los compuestos polares totales (TPM) durante la fritura continua de tres tipos de snacks: una fritura de maíz (A), un expandido frito de maíz (B) y una fritura de trigo (C).

En los tres productos los TPM mostraron un leve aumento con el tiempo (ver cuadros 11, 14 y 17 en apéndice). De 8.8 a 10.3% durante 110 horas de fritura para A, de 9.5 a 10.7% durante 135 horas para el snack B y de 7.7 a 9.0% durante 147 horas de fritura del snack C. La correlación de las variables fue baja en todos los casos (coeficientes de correlación de Pearson de $R^2=0.681$, 0.424 y 0.064, para A, B y C, respectivamente).

El incremento en el contenido de compuestos polares totales se da no sólo debido a la degradación térmica del aceite durante la fritura, sino también a la interacción de este con el alimento, lo que promueve la formación de compuestos provenientes de la degradación hidrolítica, además del contacto con el oxígeno, lo que provoca la degradación oxidativa.

La degradación del aceite durante la fritura es un proceso complejo que involucra tanto la transferencia de calor (desde el aceite hacia el snack) como de masa (pérdida de humedad en el alimento y absorción del aceite en el mismo).

Además de las reacciones de polimerización, hidrólisis y oxidación, también hay otros factores que intervienen en la degradación del aceite como la presencia de trazas de metales (como hierro y cobre) que aceleran la oxidación, la degradación enzimática durante el almacenamiento (lipasas y lipooxigenasas), el tipo de freidor, la composición de la materia prima, la tasa de recambio, la filtración del aceite durante la fritura, entre otros.

Chen, 2013, reportó que durante la fritura de papas fritas, filete de pierna de pollo y chuleta de cerdo, los TPM aumentaron linealmente con el tiempo, utilizando el equipo Testo 270 para medir la calidad de aceites de palma y de soya. De forma similar, Bolourian, 2011, monitoreó la calidad de aceite de palma y encontró que los TPM aumentan linealmente con la fritura.

Los resultados de este estudio no corresponden con los de los autores anteriormente mencionados, ya que no se encontró un incremento lineal de los TPM con el tiempo. Sin embargo, las condiciones de operación difieren de ese experimento, en que al tratarse de un proceso Batch, no existía un reemplazo de aceite usado por nuevo (no existió un recambio de aceite), y los TPM podían acumularse en el freidor.

También se comparó con los resultados de Ferreira, 2014, que utilizó aceite de palma en un proceso de fritura continua de pollo empanizado y evaluó su calidad utilizando el equipo Testo 265. Los resultados de este estudio demostraron que los compuestos polares totales tienen una relación lineal con el tiempo de fritura, con un coeficiente de $R^2=0.941$ y que de los parámetros de calidad evaluados (ácidos grasos libres, índice de refracción y viscosidad) los TPM fueron los únicos que se acumularon durante la fritura.

Sin embargo, en el estudio de Ferreira, se utilizó una tasa de recambio constante de cuatro horas, lo que implica que cada cuatro horas se adicionaba el volumen del freidor completo (cada 15 minutos, se transferían automáticamente 75 litros de aceite nuevo al freidor).

Paul y Mittal, 1997, afirman que la tasa de recambio es el factor más importante a considerar para mantener la calidad del aceite durante las operaciones de fritura continua, pues incluso al controlar los otros aspectos durante el proceso (humedad, filtración, temperatura, etc.) si se tiene una tasa de recambio mayor a 20 horas, el aceite se deteriorará luego de pocos días de uso y deberá reemplazarse completamente.

Una razón por la cual en este estudio no se encontraron resultados similares a los de Ferreira, es que la tasa de recambio de los freidores utilizados para los tres snacks no era constante. Se debe tomar en cuenta que a diferencia de los estudios presentados en los artículos consultados, en este caso se estaba estudiando un proceso productivo real de una empresa de snacks, durante sus condiciones rutinarias de operación, incluyendo todas las variaciones que se dan en una industria durante su funcionamiento.

La adición variable de aceite fresco durante el proceso de fritura, para reemplazar el aceite que es absorbido por el snack, provoca que la concentración de los compuestos de alteración formados durante la fritura disminuya (Ghidurus, 2013).

No existe un incremento lineal de los TPM durante el tiempo, ya que al formarse estos compuestos y alcanzar un valor máximo, se tienen consecuentes disminuciones debido al ingreso de aceite nuevo, teniendo altas y bajas alrededor de una tendencia central.

Sin embargo, los valores en los puntos máximos, no sobrepasan el límite establecido por la regulación europea, que establece un nivel máximo de 25% en países como Alemania, Bélgica, España, Francia, Italia y Portugal (Goodburn, 2001). La regulación vigente en Guatemala (normas Coguanor) no ha establecido directrices para controlar la calidad de aceites de fritura.

Bou, 2012, realizó un estudio durante las condiciones rutinarias de fritura en donde evaluó los cambios en las características de calidad del aceite durante la fritura continua de papalinas, en tres diferentes industrias que utilizaban aceite de palma y/o de girasol y atribuyó las diferencias en la evolución de los parámetros de calidad, tanto dentro de las mismas compañías, como entre compañías a las diferencias en la tasa de recambio.

Si bien en este experimento no se midió la tasa de recambio para ninguno de los snacks, en los tres casos se observó que la tasa de recambio del aceite dependía de las necesidades de producción (según la demanda del producto). Durante el proceso, se observó que el flujo de producto a freír no era constante, ya que se tenían paros del freidor, recesos, y una cantidad variable de máquinas empacadoras, dependiendo de la demanda de producción.

Autores como Bou reconocen que estos parámetros tienen una influencia significativa durante la degradación del aceite, ya que durante los paros del freidor o disminuciones de flujo, existe una reducción de la degradación hidrolítica del aceite, sin embargo, aún se tienen cambios oxidativos importantes a bajas

temperaturas y una degradación térmica, ya que el aceite sigue calentándose dentro del freidor (Bou, 2012).

A pesar de que en esta investigación los TPM no mostraron una alta correlación lineal con el tiempo, Marmesat, 2007, establece que este no es un factor necesario cuando el objetivo de utilizar un equipo de análisis rápido (como el Testo 270) es conocer el momento en que el aceite de fritura debe descartarse, según los límites de TPM. El autor indica que es más importante lo que ocurre alrededor del punto de rechazo del aceite (las últimas etapas de degradación), que el tener una alta correlación entre los TPM y el tiempo en todo intervalo de la fritura.

En el experimento dos se analizaron paralelamente los parámetros de TPM, acidez y peróxidos en las muestras de aceite de fritura de los tres snacks. En todos los casos, los TPM mostraron un coeficiente de correlación con el tiempo diferente al del experimento uno. Esto se puede atribuir a que el tiempo total de fritura fue diferente de un experimento a otro, además de la variabilidad de las condiciones de operación, como se mencionó anteriormente (flujos de alimentación, paros del freidor, etc.).

En todos los aceites, los datos de TPM se encontraron en el rango de aceite fresco 1-14% (Testo AG, 2014). Esto indica que durante los primeros 3-5 días de fritura, el aceite no experimenta cambios significativos en la degradación. Paul y Mittal, 1996, determinaron que los productos de descomposición durante las primeras etapas de degradación (4-5 días) son en su mayoría ácidos grasos libres, los cuales representan entre el 49-69% de la descomposición. Esta es una explicación de porqué los TPM no aumentaron considerablemente, ya que toman en cuenta otros compuestos de degradación, no solamente los FFA.

Comparando el comportamiento de los compuestos polares totales durante la fritura de los tres snacks, se observa que los valores de TPM a lo largo del tiempo son, en general, más bajos para el snack C, seguido por el snack B y por último, el A. Esto se puede atribuir a diferencias en los flujos de alimentación, el tiempo de fritura y el contenido de humedad en el snack.

En el Cuadro 21 de la sección del apéndice se muestra una comparación de los factores más relevantes que influyen en el contenido de TPM, para cada uno de los snacks. Moreira, 1997, indica que el tiempo de fritura, el contenido de humedad y el área superficial del alimento (la cual en este caso, varía según la forma del snack) influye en el contenido de aceite absorbido por el mismo y por lo tanto, en la tasa de recambio.

La tasa de recambio del aceite también depende del flujo de alimentación de snack. Al existir una baja producción, el aceite se somete a mayor degradación térmica y oxidativa, en comparación con un proceso de fritura activo. Es decir, un flujo alto de alimentación de snack, representa un mayor consumo de aceite por hora y un mayor ingreso de aceite nuevo al freidor para mantener el nivel deseado en el tanque, permitiendo así, una estabilidad en los TPM. Como lo establecieron Paul y Mittal, 1997, la concentración de TPM disminuye con una tasa de recambio alta.

Un factor que también interviene en la degradación del aceite de fritura es el diseño del freidor. El de A es más moderno y cuenta con un mecanismo de calentamiento indirecto, en donde se pasa a través de un intercambiador de calor, mientras que para B y C, existe un calentamiento directo en el freidor (por llama). Además, el aceite de A se filtra continuamente a través de una recirculación del aceite en un filtro externo, lo que permite la remoción de partículas y finos (que aceleran la degradación hidrolítica y oxidativa), aumentando la vida útil del aceite.

El snack C es el que muestra una menor degradación, ya que tiene un flujo alto de alimentación y un tiempo corto de fritura, lo que contribuye a que exista un menor contenido de TPM. El snack A también tiene un flujo de alimentación alto (tasa de recambio alta y menor incremento de TPM), pero tiene mayor humedad que el snack C. Un mayor contenido de humedad implica que hay más agua disponible para ser liberada en el aceite y provocar una mayor degradación hidrolítica del mismo.

Por otro lado, el snack B tiene la humedad más baja de todos, lo que hace que los compuestos polares totales se mantengan estables con el tiempo (como se

observa en la figura doce, que muestra una tendencia casi horizontal). Sin embargo, el flujo de alimentación es más bajo, lo que combinado al hecho de que no cuenta con un sistema de filtración, hace que en el límite del proceso se alcancen valores más altos de TPM en este aceite (como se discutirá más adelante, en el tercer experimento).

Otro análisis de calidad realizado en los aceites fue el índice de peróxidos. Estos mostraron una tendencia oscilante en los tres snacks. Los valores estuvieron entre 4.67-11.70 meq O₂/kg de muestra para el aceite de A, 2.04-10.16 meq O₂/kg de aceite para B y 1.24-5.29 meq O₂/kg de aceite para C.

Los valores máximos de índice de peróxidos alcanzados en el aceite del snack A y B sobrepasan ligeramente el límite establecido en el Codex Stan 19-1981 para grasas y aceites comestibles, el cual es de 10 meq O₂/kg de aceite. En el estudio de Ali, 2014, también se sobrepasó este límite durante la fritura por Batch de nuggets de pollo en aceite de canola, alcanzando hasta los 26 meq O₂/kg de aceite.

Enrique-Fernández, 2011, monitoreó la calidad del aceite de fritura durante un proceso discontinuo y encontró que los peróxidos incrementan hasta un valor máximo, seguido de una disminución, ya que se degradan en otros compuestos secundarios (aldehídos, cetonas, etc.). Otros autores como Bolourian, 2011, y Ali, 2014, encontraron resultados similares. Sin embargo, la metodología usada en estos casos era una fritura por Batch.

Pantzaris, 1998, publicó un artículo en donde se analiza el valor de peróxidos durante la fritura continua de diferentes tipos de aceites (oliva, soya, palma y girasol) y obtuvo resultados similares a los de este trabajo de investigación, en donde los peróxidos en el aceite de palma disminuyeron alrededor del tercer día de fritura, para aumentar nuevamente, hasta el día 5, mostrando una tendencia oscilante (ver Figura 23 en apéndice).

El autor argumenta que si bien el índice de peróxidos es un buen parámetro de calidad en el aceite durante condiciones normales de oxidación, cuando se utiliza

durante la fritura continua, puede ser engañoso, en especial porque los peróxidos se destruyen bajo las condiciones de fritura continua. Además, este método requiere de mayor tiempo de análisis y mayor uso de reactivos. Por esta razón, no es el procedimiento más adecuado para evaluar la degradación del aceite de fritura discutido en esta investigación.

Ismail, 2005, obtuvo resultados similares a los de este trabajo de investigación, al cuantificar los peróxidos durante la fritura continua de papalinas, con una tasa de recambio de ocho horas. El valor de peróxidos aumentó alrededor de las 119 horas de fritura, para disminuir y aumentar nuevamente a las 276 horas (ver Figura 24 en apéndice).

El comportamiento oscilante de los peróxidos en la fritura se puede atribuir a que durante las primeras horas, se tiene una formación continua de hidroperóxidos (compuestos de oxidación primaria), pero estos se descomponen en otra variedad de compuestos secundarios, provocando su disminución. Sin embargo, al ingresar aceite nuevo al freidor, se repite este proceso, dándose nuevamente la formación de hidroperóxidos, razón por la cual las gráficas tienen un patrón de comportamiento creciente y luego decreciente.

Los valores de acidez (expresada en porcentaje en peso, por facilidad de interpretación de datos) para los tres snacks se encontraron dentro de los límites máximos establecidos para las condiciones del proceso estudiado, previamente mencionadas en la metodología de esta investigación (25% para el snack A, 60% para el B y 20% para el C).

El porcentaje de acidez tuvo valores entre 10.2-16.6% para A, 7.7-46.1% para B y 6.4-9.5% para C. Las diferencias en estos rangos se atribuyen a los factores mencionados con anterioridad (contenido de humedad en el alimento, tiempo de residencia en el freidor, flujo de producto, tasa de recambio del aceite, acumulación de finos y partículas, etc.). Todos los valores de porcentaje de índice de acidez se encontraron dentro del límite máximo de la norma Codex Stan 19-1981 (60 % en peso).

En los tres productos se observó un incremento de los ácidos grasos libres (FFA) durante el tiempo de fritura, con correlaciones lineales de $R^2=0.674$ para A, $R^2=0.568$ para B y $R^2=0.569$ para C. Estos eran los resultados esperados, ya que al interactuar la humedad del alimento con el aceite de fritura, ocurre una reacción hidrolítica que da como resultado ácidos grasos libres y glicerol, haciendo que el índice de acidez incremente.

En general, se obtuvieron coeficientes de correlación más altos que en el análisis de TPM. Se debe considerar que los FFA y los TPM son compuestos con distinta estructura y origen, y su incremento indica un estado de degradación distinto (Cížková, 2011). Además, algunos estudios hechos por Paul y Mittal, 1996, al medir los cambios en la composición química del aceite durante la fritura demostraron que la concentración de FFA aumenta independientemente de un recambio alto de aceite, mientras que los TPM disminuyen con tasas de recambio altas, posiblemente porque los FFA son compuestos de degradación primaria y factores como la luz y la oxidación hacen que se conviertan en otros compuestos polares.

En el estudio realizado por Ali, 2014, también se identificó un aumento de los FFA con el tiempo de fritura, siendo así un índice de la rancidez hidrolítica. Sin embargo, el autor señala que no es recomendado utilizar este análisis como el único indicador para descartar aceites usados.

Ali indica que utilizar el análisis de ácidos grasos libres como indicador de la degradación del aceite sigue siendo controversial, ya que los niveles de FFA pueden no afectar el desempeño del aceite de fritura, ni tener efectos adversos en la salud y evaluación sensorial.

Un aspecto a resaltar es la diferencia en la tendencia de los ácidos grasos libres, compuestos polares totales y peróxidos que se observa en las gráficas de los tres snacks (Figuras 14-22). Como se mencionó con anterioridad, los peróxidos tienen una tendencia oscilante, mientras que los TPM tienden a aumentar ligeramente con el tiempo alrededor de una tendencia central. Por otro lado, el índice de acidez se comporta de forma más lineal con el tiempo de fritura.

Los tres análisis cuantifican compuestos de diferentes reacciones de degradación del aceite. Los peróxidos únicamente toman en cuenta componentes producidos por la oxidación, los ácidos grasos libres se forman por hidrólisis, mientras que los TPM incluyen compuestos provenientes de la hidrólisis, oxidación y polimerización. De esta forma, cada una de las gráficas obtenidas en el experimento dos representa un aspecto diferente de la degradación del aceite y estos análisis no pueden compararse, más bien se complementan entre sí.

En el tercer experimento se evaluó la calidad del aceite en el límite del proceso de fritura de los tres snacks, a través de cuatro análisis de calidad, con el fin de comprobar que los resultados estaban bajo los límites máximos permisibles. Se tomó para cada producto 30 muestras de aceite con valores altos de acidez (15-25% para snack A, 45-60% para snack B y de 9-20% para snack C).

Para el snack A, los TPM variaron en un rango de 10.7-13.5%, con un promedio de $12 \pm 0.9\%$. Estos valores no sobrepasan el límite establecido por la regulación europea (25% máximo).

Los valores de acidez tuvieron un promedio de $18.7 \pm 2.8\%$, que cumple con el límite del Codex Stan 19-1981. Sin embargo, Paul y Mittal, 1996, indican que el aceite de fritura se puede utilizar hasta valores de 1.3 mg ácido/g muestra. De igual forma, algunos países europeos (Alemania, Francia y España) han establecido regulaciones y criterios para descartar aceites de fritura y recomiendan un máximo de 1.0 mg ácido/g muestra de FFA (Ferreira, 2014).

Los peróxidos tuvieron un promedio de 7.40 meq O_2 /kg de aceite, con una desviación estándar de 4.12 meq O_2 /kg de aceite, lo que muestra una gran variabilidad. Esto ocurre ya que como se demostró en el experimento dos, estos compuestos tienen una tendencia oscilante y el análisis únicamente cuantifica componentes provenientes de la oxidación, mostrando una gran variación al tratarse de una etapa de transición de degradación del aceite y no una etapa final o inicial de la reacción.

Casi todas las muestras (a excepción de cuatro) tuvieron un índice de peróxidos que se encuentran bajo el límite máximo permitido por la norma Codex Stan 19-1981. Sin embargo, esta norma no es específica para el monitoreo de aceites durante la fritura, mientras que otras regulaciones europeas cuyo ámbito de aplicación incluye aceites de fritura establecen un índice de peróxidos máximo para desechar el aceite de 15 meq O₂/kg de muestra (Ferreira, 2014).

El análisis de ácido 2-tiobarbitúrico (ATB) dio resultados muy bajos con un valor promedio de $1.16 \pm 1.13 \times 10^{-2}$ mg MDA/kg de aceite. En el estudio de Navas, 2007, en el que evaluó diferentes parámetros de calidad durante la fritura continua de snacks, encontró que el método del ATB no tenía suficiente sensibilidad para diferenciar entre muestras de aceite con diferente grado de oxidación.

En un estudio realizado por IUPAC, 1989, se evaluaron varios aceites de girasol y soya, en diferentes condiciones (a temperatura ambiente o sometidos a degradación térmica). Muestras de aceite de soya con un índice de peróxidos de 17.5 meq O₂/kg de aceite mostraron valores de hasta 0.44 mg MDA/kg. Incluso el aceite de girasol almacenado a temperatura ambiente presentó valores más altos que el obtenido en este experimento (ver Cuadro 22 en apéndice)

El análisis de ATB es un método de evaluación del deterioro oxidativo en los aceites que se basa en la reacción del malonaldehído con el ATB para formar un compuesto rojizo que se mide por espectrofotometría. El malonaldehído es un componente que proviene de la degradación de ácidos grasos poliinsaturados con 3 o más insaturaciones como el ácido linolénico (Shahidi, 2005).

El bajo índice de ATB en este experimento se puede atribuir a que el contenido de ácidos grasos triinsaturados como el linolénico, es muy bajo en el aceite de palma (0.4-0.6%) y el malonaldehído proviene de estos ácidos grasos. Algunos autores recomiendan una concentración de ácido linolénico de 2-3% para realizar este análisis (Navas, 2007).

Navas, 2007, encontró que los valores de ATB en aceites de girasol y de palma eran muy bajos cuando se sometían a fritura continua. En su estudio, algunos

datos estaban bajo el nivel de detección mínimo, lo que se atribuye a que el contenido de precursores del malonaldehído, que son ácidos grasos con más de tres dobles enlaces, es muy bajo.

Durante la experimentación, se comprobó que no existió una formación significativa de malonaldehído en la muestra, ya que no se formó el compuesto rojo que se esperaba del análisis, únicamente se observó una coloración amarilla oscura. La pureza de los reactivos se comprobó al realizar el análisis con una muestra de carne de res fresca (siendo este un producto al que comúnmente se le mide el índice de ATB) y se dio la formación del complejo de color rojo, obteniendo un valor de 0.23 mg MDA/kg de aceite.

En cuanto a la correlación entre las variables se encontró que a un nivel de confianza del 95%, sólo existe una relación estadísticamente significativa entre el índice de ATB y los peróxidos (En otras palabras, hay un 95% de seguridad que la asociación entre ambas variables no es por azar o casualidad). Estos resultados son los esperados ya que ambos parámetros son indicadores del deterioro oxidativo del aceite. Por otro lado, el resto de análisis cuantifica compuestos de diferente naturaleza provenientes de distintas vías de degradación del aceite.

Para el snack B, los TPM tuvieron un promedio de 13.7 ± 1.7 %, lo que se encuentra bajo el límite establecido por la normativa europea y dentro de la clasificación de 'aceite fresco' (Testo AG, 2014). En el experimento dos se observó que los TPM en este aceite se mantienen estables a lo largo del tiempo durante las primeras horas de fritura, sin embargo, estos alcanzan un valor mayor que el de los otros snacks en el límite del proceso.

Esto se puede atribuir a que, si bien hay un ingreso continuo de aceite en el freidor que permite que los compuestos de degradación se diluyan en el aceite, sí hay acumulación de estos en el freidor, provocando que los TPM aumenten el tiempo de fritura, como comprobó Ferreira, 2014, en su estudio.

Debe considerarse también que el calentamiento continuo del aceite genera componentes de degradación a través de la polimerización térmica y conlleva a

un aumento en los TPM (Kalogianni, 2009). Esto, junto a la presencia finos y partículas residuales (que se reduce en el freidor de A, al tener un sistema de filtración), contribuye a la acumulación de TPM. Además, a diferencia de los otros snacks, en algunas ocasiones el aceite de B se utiliza durante 8-9 días, mientras que en los demás, se descarta a los 6 días.

Otro aspecto importante es que muestras de aceite del snack B con acidez muy similar muestran TPM distintos, razón por la cual en este experimento tampoco hay un alto coeficiente de correlación de Spearman entre la acidez y los TPM, como era de esperarse, ya que son compuestos de diferente naturaleza.

Los peróxidos tuvieron un promedio de 3.63 ± 1.9 meq O_2 /kg de aceite y todas las muestras estuvieron bajo el límite del Codex Stan 19-1981. Estos valores fueron menores que en el snack A, al igual que los del índice de ATB (promedio de 0.77 ± 0.36 mg MDA/kg) que fueron bastante bajos debido a lo mencionado anteriormente, acerca del bajo contenido de ácidos grasos poliinsaturados en el aceite de palma.

Estos dos parámetros (peróxidos y ATB) indican que la degradación del aceite de B es menor que la del aceite de A. Sin embargo, los otros dos índices de calidad (TPM y FFA) muestran lo contrario. De estos, los peróxidos pueden ser engañosos durante la fritura continua (Pantzaris, 1998) pues se convierten en otros componentes de degradación secundaria y además tienen una tendencia oscilante. El ATB tampoco tiene suficiente sensibilidad para diferenciar entre muestras de aceite con diferente grado de oxidación (Navas, 2007).

En cuanto al índice de acidez, a pesar de ser uno de los más utilizados para evaluar la calidad del aceite, únicamente toma en cuenta la degradación hidrolítica, otorgando solamente información parcial del estado total de deterioro del mismo (Navas, 2007). Por lo tanto, los TPM dan un indicio más preciso de la degradación del aceite al considerar las otras vías de deterioro.

Para el snack C se tuvieron los valores de TPM más bajos (promedio de 9.4 ± 0.8 %). Esto se puede atribuir a las condiciones de proceso mencionadas

anteriormente (composición del alimento, flujo del producto, tiempo de residencia, etc.). Los valores de acidez ($10.3 \pm 1.6\%$, en promedio) están muy por debajo del límite establecido por la industria estudiada (20% máximo), a pesar de que todas las muestras se tomaron en el límite del proceso (previo a descartar el aceite), lo que indica que el aceite podría seguir utilizándose para la fritura de este producto.

Casi todas las muestras estaban por debajo del máximo permisible para el índice de peróxidos según el Codex, a excepción de 3 que lo superaron ligeramente. El promedio fue de 4.86 ± 2.72 meq O_2 /kg de aceite, pero la tendencia oscilante de este parámetro lo hace poco confiable para descartar el aceite de fritura.

En cuanto al índice de ATB (0.41 ± 0.33 mg MDA/kg) fue el más bajo de todos y de todas las variables, únicamente el ATB y los peróxidos guardan una relación estadísticamente significativa, a un nivel de confianza del 95%. Esto, ya que ambos análisis miden la degradación oxidativa del aceite.

En general, los índices de calidad de todos los aceites evaluados se encuentran bajo los valores límites permitidos por la normativa. A pesar de que las muestras se tomaron en el límite del proceso estudiado, según los parámetros de TPM establecidos en la literatura, el aceite se clasifica en la categoría de 'ligeramente usado' y se encuentra debajo de los valores máximos recomendados en diferentes estudios.

En la industria donde se llevó a cabo este trabajo de investigación sólo se utiliza el índice de acidez como criterio para descartar el aceite. Sin embargo, la fritura continua es un proceso complejo que involucra la formación de una diversidad de componentes provenientes de varias vías de degradación (oxidación y polimerización), no sólo la hidrólisis.

Los FFA únicamente reflejan los cambios hidrolíticos, que comprende sólo una parte del proceso de degradación que se produce durante la fritura. Además, diversos autores han reportado que el contenido de FFA está poco correlacionado con la calidad de los alimentos fritos (Melton, 1994).

A pesar de que los FFA están relacionados linealmente con el tiempo de fritura, en este estudio no existe una correlación entre estos y el estado de degradación del aceite, y no debería ser el único índice de calidad empleado, ya que factores como la luz, el calor y la oxidación provocan que los FFA se conviertan en otros compuestos polares totales (Moreira, 1999).

Siendo el porcentaje de TPM un valor que considera la degradación completa del aceite, se puede decir que el bajo contenido de compuestos polares totales en el punto de desecho del aceite indica un poco aprovechamiento del mismo. El análisis de todos los aceites demostró que este sigue siendo apto para su fritura y se puede extender la vida de uso.

El monitorear el aceite de fritura utilizando únicamente el análisis de acidez puede conllevar gastos innecesarios para la industria, debido a recambios de aceite, tiempo de producción perdida (al descartar el aceite antes de lo necesario), horas hombre, entre otros factores. Ya que esta metodología solo da información parcial de estado del aceite, las industrias están migrando a métodos de análisis más completos, como los TPM.

Autores como Chen (2013), Flores-Álvarez (2012) y Cížková (2011), encontraron una alta correlación utilizando el equipo Testo y el método estándar de medición de TPM (cromatografía de columna) para evaluar la calidad del aceite de fritura, demostrando que los resultados de este equipo son confiables.

En el Cuadro 10 se proponen los límites de TPM a utilizar para evaluar la calidad del aceite de cada snack. Al alcanzar el valor de la primera columna, se sugiere combinar el análisis de TPM con el de acidez, para tener más información del estado de degradación del aceite y asegurarse que no se sobrepasarán los límites establecidos por la industria estudiada. El límite máximo de TPM recomendado (previo al descarte del aceite) es el valor mostrado en la segunda columna.

Dentro de los beneficios del análisis de TPM se encuentran el hacer un uso eficiente del aceite de fritura, ser de fácil uso, bajo mantenimiento y costo de operación, tiene un rápido tiempo de respuesta (20 segundos) y no requiere el uso

de reactivos, además de que se puede ajustar los límites para dar una codificación por colores según el estado de degradación del aceite (alarma y coloración roja cuando se sobrepasó el límite).

Tomando en consideración que algunos compuestos polares totales no son digeribles y pueden causar alteraciones gastrointestinales, uno de los mayores beneficios de este equipo es asegurar la calidad del aceite de fritura evitando daños en la salud del consumidor.

Al calcular los costos mensuales (ver Cuadro 20 en apéndice) para los análisis de FFA y TPM, se obtuvo una disminución en el costo con el método de compuestos polares totales. Sin embargo, más allá del ahorro económico, el beneficio más significativo del equipo Testo es hacer un uso adecuado del aceite de fritura, asegurándose de no descartarlo antes de lo necesario.

Para utilizar debidamente el equipo Testo 270, se elaboró un manual de usuario, en el que se incluyen las especificaciones generales del equipo, instrucciones de uso, medidas de seguridad, limpieza y calibración. Este puede consultarse en la sección de apéndice.

IX. CONCLUSIONES

1. Se implementó un método de medición de Compuestos Polares Totales (TPM) para evaluar la calidad del aceite de fritura usado en la producción de tres snacks, en una industria de alimentos de Guatemala.
2. Los TPM incrementan de forma no lineal con el tiempo de fritura alrededor de una tendencia central (debido a variaciones en las condiciones de proceso, especialmente la tasa de recambio del aceite). Los valores en los puntos máximos no sobrepasan el límite establecido por la regulación europea (25%) y según la literatura, todos los aceites evaluados en el experimento uno se clasifican como 'aceite fresco', con un 1-14% de TPM (Testo AG, 2014).
3. La diferencia en la tendencia de los TPM, FFA e índice de peróxidos se debe a que los tres análisis cuantifican compuestos diferentes provenientes de distintas vías de degradación del aceite. Además, el comportamiento de estos parámetros varía de un snack a otro al tener distintas condiciones de fritura y materias primas.
4. El índice de peróxidos no es un método adecuado para evaluar la calidad del aceite durante la fritura continua, debido a su tendencia oscilante. Tampoco lo es el análisis de ATB, ya que la concentración de ácidos grasos poliinsaturados (precursores del MDA) en el aceite de palma es baja. Por lo tanto, ambos resultados no son significativos.
5. De los índices de calidad medidos, solamente el ATB y el índice de peróxidos tienen relación estadística significativa (a un nivel de confianza del 95%), según los coeficientes de correlación de Spearman.

6. Los datos de TPM y FFA medidos en el límite del proceso de fritura no sobrepasan los valores máximos establecidos por la normativa, la literatura y en el caso de los FFA, tampoco superan los límites definidos por la industria estudiada. Esto indica que aun cuando se descarta, el aceite está en buenas condiciones y da un indicio de que se puede extender su vida de uso, proyectando un ahorro a la empresa, en el proceso de fritura.
7. El índice de acidez no se debe utilizar como el único criterio para descartar el aceite de fritura porque sólo considera la degradación hidrolítica del aceite, otorgando información parcial del estado total de su deterioro, debido a que los TPM aún son aceptables.
8. El equipo Testo 270 que se utilizó en este estudio presenta diversas ventajas que incluyen dar resultados confiables y un rápido tiempo de respuesta. Además, es de fácil uso y mantenimiento, no requiere el uso de reactivos y sobre todo, se puede hacer un uso eficiente del aceite de fritura.

X. RECOMENDACIONES

1. Debido a que los TPM son un parámetro más completo de la degradación del aceite, se recomienda sustituir el análisis de acidez por el de TPM para monitorear el aceite durante los primeros 4-5 días de fritura, minimizando el tiempo requerido y los recursos económicos necesarios (ver Cuadro 20 en apéndice).
2. Se sugiere utilizar los límites máximos de TPM propuestos en el Cuadro 10 (ver sección de resultados) y al alcanzar los valores recomendados, combinarlo con el análisis de acidez.
3. Corroborar si los límites máximos de acidez utilizados en la industria estudiada son adecuados o se puede extender la vida de uso del aceite. Para esto, realizar pruebas de vida útil en el producto y validar que no existe ninguna repercusión negativa en la calidad del snack. De igual forma, determinar con el tiempo de extra de uso del aceite, el ahorro económico que puede representar para la empresa.
4. Hacer una revisión del valor máximo permisible de índice de acidez establecido en la norma Codex Stan 19-1981, ya que esta no es específica para aceites durante el proceso de fritura y la normativa europea permite valores más altos de estos parámetros.
5. Evaluar la implementación de un sistema de filtración en los freidores de los snacks B y C, con el fin de remover las partículas y finos acumulados en el equipo y alargar la vida de uso del aceite, al disminuir su degradación hidrolítica y oxidativa.

6. Disminuir los tiempos de paro del freidor y disminuir la temperatura del equipo durante los tiempos muertos, para evitar la degradación térmica y oxidativa del aceite.
7. Complementar este trabajo de investigación al realizar mediciones posteriores que permitan asociar la calidad del aceite con las condiciones de proceso (flujos de alimentación de snack, tasa de recambio del aceite, tiempos de paro y demandas de producción, etc.). O bien, mantener las condiciones de procesamiento constantes y evaluar los resultados obtenidos.
8. Hacer uso del manual del equipo Testo 270 adjuntado en este trabajo de investigación (ver apéndice) para utilizar adecuadamente el equipo.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Ali, M. *et al.* 2014. Impact of chicken nugget presence on the degradation of canola oil during frying. *International Food Research Journal* 21(2):1119-1124.
2. Alparslan, *et al.* 2013. Effects of scale and skin on chemical and sensory quality of marinated sea bass filets (*Dicentrarchus labrax*, L. 1758) in sunflower oil during storage at 4°C. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 25(7): 516-523.
3. AOAC. 2012. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 19a ed. AOAC International, Maryland. 1990 pp.
4. AOCS. 2015. About AOCS [documento en línea] en: <<http://www.aocs.org/Membership/content.cfm?ItemNumber=736&navItemNumber=995>> Formato HTML. [Con acceso el 3 de octubre de 2015].
5. Blanco, N. *et al.* 2006. Vida útil del aceite de girasol Alto Oleico y del aceite de girasol convencional durante el proceso continuo de fritura de maní. Tesis de Licenciatura en nutrición, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 47 pp.
6. Bolourian. *et al.* 2011. Evaluation of thermal resistance and efficiency of palm olein and canola oils in frying of potato chips. [documento en línea] en: <<http://www.icef11.org/content/papers/aft/AFT078.pdf>> Formato PDF. [Con acceso el 10 de enero de 2015]
7. Boskou, D. e I. Elmadfa. 2010. *Frying of food: oxidation, nutrient and non-nutrient antioxidants, biologically active compounds and high temperatures*. 2a ed. CRC Press, Florida. 328 pp.

8. Bou. *et al.* 2012. Quality assessment of frying fats and fried snacks during continuous deep fat frying at different large-scale producers. *Food Control* 27(1):254-267.
9. Casimir, A. *et al.* 2012. *Palm oil, Production, Processing, Characterization and Uses*. AOCS, Illinois. 838 pp.
10. Chen, W. *et al.* 2013. Total Polar Compounds and Acid Values of Repeatedly Used Frying Oils Measured by Standard and Rapid Methods. *Journal of Food and Drug Analysis* 21(1):58-65.
11. Choe, E. y D. Min. 2007. *Chemistry of Deep-Fat Frying Oils*. *Journal of Food Science* 72(5):77-86.
12. Cížková, H. *et al.* 2011. Survey study of frying oils used by food services in the Czech Republic. *Journal of Food and Nutrition Research* 50(3):177-181.
13. Codex Alimentarius. 2009. Norma del CODEX para grasas y aceites comestibles no regulados por normas individuales CODEX STAN 19-1981. [documento en línea] en: <<http://www.uclm.es/profesorado/mdsalvador/58119/practicas/Codex%20Stan%2019%20Grasas%20y%20aceites.pdf>> Formato PDF [Con acceso el 24 de enero de 2015]
14. Codex. 2015. Acerca del Codex. [documento en línea] en: <<http://www.codexalimentarius.org/about-codex/es/>> Formato HTML. [Con acceso el 16 de septiembre de 2015]
15. EMPORIT LLC. Fecha desconocida. White Paper: Monitoring Polar Compounds in Fryer Oil. [documento en línea] en: <<http://emporitllc.com/wp-content/uploads/2013/02/White-Paper-Monitoring-polar-compounds-in-fryer-oil.pdf>> Formato PDF. [Con acceso el 10 de enero de 2015]
16. Enríquez-Fernández, E. *et al.* 2011. Comparison of the stability of palm olein and palm olein/canola oil blend during deep-fat frying of chicken

- nuggets and French fries. *International Journal of Food Science and Technology* 46(1):1231-1237.
17. Escobar, M. 2012. Determinación de la calidad proteica y aceptabilidad de tres formulaciones de tortillas de maíz y frijol tipo “snack”. Tesis de Maestría en Alimentación y Nutrición, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 82 pp.
 18. FDA. 2015. What does FDA do? [documento en línea] en: <<http://www.fda.gov/AboutFDA/Transparency/Basics/ucm194877.htm>> Formato HTML. [Con acceso el 16 de septiembre de 2015]
 19. Ferreira, D. *et al.* 2014. Alterations of palm oil (*Elaeis guineensis*) in the continuous industrial par frying of breaded chicken snacks. *Food Science and Technology* 34(1):32-37.
 20. Flores-Álvarez, M. *et al.* 2012. The Effect of Food Type (Fish Nuggets or French Fries) on Oil Blend Degradation during Repeated Frying. *Journal of Food Science* 77(11):1135-1143.
 21. GERSON. 2012. Guía para determinar la vida útil en anaquel. [documento en línea] en: <http://www.pymerural.org/docs/vida_util_anaquel.pdf> Formato PDF. [Con acceso el 25 de enero de 2015]
 22. Ghidurus, M. *et al.* 2013. Hazards associated with fried fast food products. *Romanian Biotechnological Letters* 18(4):8391-8396
 23. Goodburn, K. 2001. *EU Food Law: A Practical Guide*. 1a ed. Woodhead Publishing Limited, Cambridge. 256 pp.
 24. IUPAC, 1989. Determination of 2-Thiobarbituric acid value: direct method. *Pure and Applied Chemistry* 61(6):1165-1170.
 25. IUPAC. 2015. About. [documento en línea] en: <<http://www.iupac.org/home/about.html>> Formato HTML. [Con acceso el 16 de septiembre de 2015]

26. Ismail, R. 2005. Palm oil and palm olein frying applications. *Asia Pacific Journal of Chemical Nutrition* 14(4):414-419.
27. Kalogianni, E. *et al.* 2009. Effect of the Presence and Absence of Potatoes under Repeated Frying Conditions on the Composition of Palm Oil. *Journal of American Oil Chemists' Society* 86(1):561-571.
28. Mahesar, S. *et al.* 2014. Analytical approaches for the assessment of free fatty acids in oils and fats. *Analytical Methods* 6(1):4956-4963.
29. Man, D. y A. Jones. 2000. *Shelf Life Evaluation of Foods*. 2a ed. Springer Science & Business Media, New York. 272 pp.
30. Marcombo. 1988. *Introducción a la bioingeniería*. 1a ed. Marcombo, Barcelona. 324 pp.
31. Marmesat, S. *et al.* 2007. Quality of used frying fats and oils: comparison of rapid tests based on chemical and physical oil properties. *International Journal of Food Science and Technology* 42(1):601-608.
32. Melton, S. *et al.* 1994. Review of stability measurements for frying oils and fried food flavor. *Journal of American Oil Chemists' Society* 71(1):1301-1306.
33. Mohamad, N. 2012. Effect of type of fried foods in the quality of frying oil. Tesis, Universidad Tecnológica MARA, Malasia. 90 pp.
34. Moreira, R. *et al.* 1999. *Depp-Fat Frying*. 1ª ed. Aspen Publishers, Inc., Maryland. 350 pp.
35. Navas, J. *et al.* 2007. Optimization of analytical methods for the assessment of the quality of fats and oils used in continuous deep fat frying. *Grasas y Aceites* 58(2):154-162.
36. O'Brien, R. 2008. *Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications*. 3ª ed. CRC Press, Florida. 680 pp.
37. Pantzaris, T. 1998. Comparison of monounsaturated and polyunsaturated oils in continuous frying. *Grasas y aceites* 49(3):319-325.

38. Patrón, A. y L. Cartaya, 1961. Aceites y grasas industriales. 1ª ed. Reverte, Barcelona. 746 pp.
39. Paul, S. y Mittal, G. 1996. Dynamics of fat/oil degradation during frying based on optical properties. *Journal of Food Engineering* 30(1):389-403.
40. Rincón, S. y Martínez, D. 2009. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *PALMAS* 30(2):11-24.
41. Rojas, E. y Narváez, P. 2011. Método de análisis de calidad del aceite durante el freído por inmersión de pequeñas y medianas empresas. *Ingeniería e Investigación* 31(1):83-92.
42. RTCA. 2010. Etiquetado General de Alimentos Previamente Envasados. documento en línea] en: < <http://www.ccit.hn/wp-content/uploads/2014/09/Preenvasados.pdf>> Formato PDF. [Con acceso el 25 de enero de 2015]
43. Shahidi, F. 2005. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. 6a ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. 3616 pp.
44. Shater, E. *et al.* 2012. Studies on fat in some chicken products with trial to prevent its oxidation. *New York Science Journal* 5(10):56-63.
45. Suarterna, A. 2009. La fritura de los alimentos: el aceite de fritura. *Perspectivas en Nutrición humana* 11(1):39-53.
46. Testo AG. 2014. Field Guide Cooking Oil Measurement. [documento en línea] en: <http://www.testo.com.cn/resources/media/global_media/download_files/pocket_guide/Field_Guide_Cooking_oil_2981_3014_EN.pdf> Formato PDF [con acceso el 24 de enero de 2015].
47. Valcárcel, M. 1988. Técnicas analíticas de separación. 1ª ed. Reverte, Barcelona. 800 pp.
48. Wai, T. 2007. Local Repeatedly-Used Deep Frying Oils Are Generally Safe. *International e-Journal of Science, Medicine & Education* 1(2):55-60.

49. Yilmaz, E. y Aydeniz, B. 2011. Quantitative assessment of frying oil quality in fast food restaurants. *GIDA* 36(3):121-127.
50. Zapata, A. *et al.* 2014. Oleína de Palma Estabilizada con Antioxidante Natural de Romero en un Proceso Discontinuo de Fritura. *Información Tecnológica* 25(2):131-140.

XII. APÉNDICE

A. Cuadros y gráficas

Cuadro 11. TPM con el tiempo de fritura, en aceite de snack A

Hora	TPM (%)	Hora	TPM (%)
0	8.8 ± 0.3	70	10.2 ± 0.3
2	8.7 ± 0.3	71	10.0 ± 0.0
6	8.3 ± 0.3	72	10.7 ± 0.3
14	9.8 ± 0.3	74	10.3 ± 0.3
22	8.5 ± 0.9	78	11.7 ± 0.3
24	9.0 ± 0.0	86	10.5 ± 0.5
26	9.3 ± 0.3	94	11.6 ± 0.1
46	9.2 ± 0.3	97	10.8 ± 0.3
48	10.5 ± 0.0	98	10.5 ± 0.0
50	10.0 ± 0.0	102	12.0 ± 0.5
62	11.2 ± 0.3	110	10.3 ± 0.6

Cuadro 12. TPM, peróxidos y acidez con el tiempo, en muestras de aceite de fritura de snack A

Tiempo	TPM (%)	Peróxidos (meq O ₂ /kg)	Acidez (%)
0	9.3 ± 0.3	7.02 ± 0.36	10.2 ± 0.7
4	9.5 ± 0.0	11.70 ± 0.54	12.8 ± 1.3
16	8.8 ± 0.6	4.87 ± 1.40	13.1 ± 1.5
24	8.5 ± 0.0	6.75 ± 1.22	12.8 ± 0.7
28	8.5 ± 0.0	4.67 ± 1.53	14.1 ± 0.7
40	8.8 ± 0.3	9.21 ± 2.45	16.6 ± 0.9
44	11.3 ± 0.3	5.27 ± 1.28	14.1 ± 1.1

El cuadro inferior muestra los coeficientes de correlación de Spearman (r) de las cuatro variables medidas (TPM, Peróxidos, acidez y ATB) y su respectiva probabilidad (p), utilizando una prueba de dos colas. A un nivel de confianza del 95%, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables peróxidos y ATB. Por otro lado, la relación entre el resto de variables no es estadísticamente significativa.

Cuadro 13. Coeficientes de correlación de Spearman entre variables (TPM, peróxidos, acidez y ATB), para aceite de fritura de snack A.

TPM	Peróxidos	Acidez	ATB	
r=1 n=30	r=0.076 p (0.69) n=30	r=0.060 p (0.75) n=30	r=0.532 p (0.06) n=15	TPM
	r=1 n=30	r=0.314 p (0.09) n=30	r=-0.507 p (0.05) n=15	Peróxidos
		r=1 n=30	r=-0.480 p (0.07) n=15	Acidez
			r=1 n=15	ATB

Cuadro 14. TPM con el tiempo de fritura, en aceite de snack B

Hora	TPM (%)	Hora	TPM (%)
0	9.5 ± 0.3	80	10.2 ± 0.3
2	9.3 ± 0.3	88	9.7 ± 0.3
3.5	9.8 ± 0.3	96	10.3 ± 0.3
9	9.7 ± 0.3	98	10.3 ± 0.3
14	10.2 ± 0.3	99	10.2 ± 0.3
26	9.7 ± 0.0	105	9.7 ± 0.3
32	10.0 ± 0.0	112	10.7 ± 0.5
38	9.5 ± 0.0	120	10.5 ± 0.3
49	10.0 ± 0.3	128	9.8 ± 0.3
51	9.7 ± 0.3	135	10.7 ± 0.0
64	10.2 ± 0.3		

Cuadro 15. TPM, peróxidos y acidez con el tiempo, en muestras de aceite de fritura de snack B

Tiempo	TPM (%)	Peróxidos (meq O ₂ /kg)	Acidez (%)
0	8.7 ± 0.3	4.67 ± 1.01	7.7 ± 0.5
4	8.0 ± 0.0	7.03 ± 2.53	25.6 ± 1.7
12	9.3 ± 0.3	4.19 ± 0.18	29.4 ± 1.5
20	10.0 ± 0.5	4.92 ± 1.17	33.3 ± 1.0
28	10.0 ± 0.0	4.25 ± 1.37	33.3 ± 1.6
33	9.8 ± 0.3	8.76 ± 1.47	38.4 ± 0.7
35	9.3 ± 0.3	3.10 ± 0.58	46.1 ± 1.5
44	9.7 ± 0.3	2.74 ± 0.16	35.8 ± 1.7
49	10.2 ± 0.3	10.16 ± 1.24	41.0 ± 1.9
61	9.7 ± 0.3	4.56 ± 1.07	42.2 ± 1.7
67	10.0 ± 0.5	3.45 ± 0.29	41.0 ± 1.5
75	9.5 ± 0.0	2.04 ± 0.10	43.5 ± 0.9
86	10.0 ± 0.3	2.70 ± 0.77	43.5 ± 1.0
94	8.5 ± 0.0	3.00 ± 0.61	43.5 ± 1.4
105	10.2 ± 0.3	5.77 ± 0.60	43.3 ± 1.7

El coeficiente de correlación de Spearman (ver cuadro 16), demostró que a un nivel de confianza del 95%, no existe una relación estadística significativa entre ninguna de las variables de calidad, para el snack B.

Cuadro 16. Coeficientes de correlación de Spearman entre variables (TPM, peróxidos, acidez y ATB), para aceite de fritura de snack B.

TPM	Peróxidos	Acidez	ATB	
r=1 n=30	r=0.215 p (0.26) n=30	r=0.499 p (0.06) n=30	r=-0.422 p (0.12) n=15	TPM
	r=1 n=30	r=-0.369 p (0.07) n=30	r=-0.419 p (0.12) n=15	Peróxidos
		r=1 n=30	r=0.235 p (0.40) n=15	Acidez
			r=1 n=15	ATB

Cuadro 17. TPM con el tiempo de fritura, en aceite de snack C

Hora	TPM (%)	Hora	TPM (%)
0	7.7 ± 0.3	64	9.0 ± 0.5
2	7.5 ± 0.5	79	8.7 ± 0.3
3	8.0 ± 0.0	88	8.5 ± 0.0
9	8.7 ± 0.3	96	8.2 ± 0.3
16	9.2 ± 0.3	98	8.0 ± 0.0
24	8.8 ± 0.3	104	9.2 ± 0.3
32	8.8 ± 0.3	112	9.0 ± 0.5
40	8.3 ± 0.3	120	9.0 ± 0.0
49	7.5 ± 0.0	127	9.0 ± 0.0
51	8.0 ± 0.0	135	7.5 ± 0.5
57	9.5 ± 0.0	147	9.0 ± 0.0

Cuadro 18. TPM, peróxidos y acidez con el tiempo, en muestras de aceite de fritura de snack C

Tiempo	TPM (%)	Peróxidos (meq O ₂ /kg)	Acidez (%)
0	8.3 ± 0.3	1.24 ± 0.37	7.7 ± 0.3
6	7.0 ± 0.0	2.49 ± 0.03	6.4 ± 0.5
22	8.0 ± 0.3	2.80 ± 0.33	7.7 ± 0.3
30	8.2 ± 0.3	2.40 ± 0.07	7.4 ± 0.7
38	8.2 ± 0.3	2.14 ± 0.16	9.0 ± 0.5
46	8.7 ± 0.3	1.80 ± 0.06	7.6 ± 0.7
50	8.0 ± 0.0	2.94 ± 0.11	7.7 ± 0.5
58	8.2 ± 0.3	3.93 ± 0.25	9.0 ± 0.5
66	8.7 ± 0.3	5.29 ± 0.32	9.5 ± 0.3
68	9.0 ± 0.5	2.68 ± 0.10	9.0 ± 0.7

Al determinar la correlación estadística de las variables medidas, utilizando el coeficiente de Spearman, se encontró que únicamente el ATB y los peróxidos guardan una relación estadísticamente significativa, a un nivel de confianza del 95%.

Cuadro 19. Coeficientes de correlación de Spearman entre variables (TPM, peróxidos, acidez y ATB), para aceite de fritura de snack C.

TPM	Peróxidos	Acidez	ATB	
r=1 n=30	r=0.072 p (0.71) n=30	r=0.098 p (0.61) n=30	r=-0.062 p (0.83) n=15	TPM
	r=1 n=30	r=-0.156 p (0.41) n=30	r=-0.646 p (0.01) n=15	Peróxidos
		r=1 n=30	r=0.367 p (0.18) n=15	Acidez
			r=1 n=15	ATB

Cuadro 20. Costos de análisis mensual de TPM e índice de acidez

	Acidez	TPM
Tiempo de análisis (por turno)	30 minutos	2 minutos
Reactivos	Alcohol etílico 95% NaOH 0.1 N Solución de fenolftaleína	N.A
Cristalería y Equipo	Tomador de muestra Erlenmeyer de 250 mL Bureta Probeta Agitador magnético Estufa Cronómetro Soporte de metal	Tomador de muestra Testo 270
Costo promedio de reactivos por turno*	Q7.74	N.A
Costo de mano de obra directa por turno*	Q8.72	Q0.58
Costo de mantenimiento mensual	N.A	2 Baterías AAA** Q5.91 Estándar de calibración (semestral) Q145.3
Costo total mensual	Q822.68	Q180.24
Costo mensual de análisis combinados***	Q410.60	

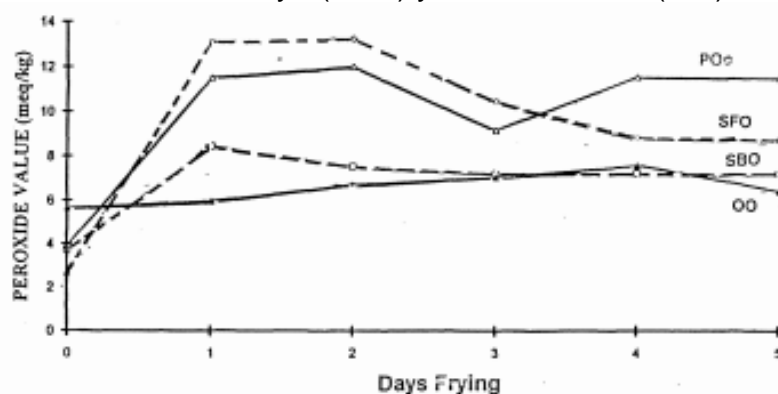
*Tres muestras, dos veces por turno. **vida útil de baterías de 660 mediciones, según Testo AG, 2014. ***Asumiendo que se utiliza el análisis de FFA durante el límite del proceso (sólo 7 días al mes)

Cuadro 21. Factores que influyen en el contenido de TPM durante la fritura

Factor	Snack A	Snack B	Snack C
↑ Tiempo de fritura ↑ TPM	27 s (↑)*	46 s (↑)	12 s (↓)
↑ Temperatura de fritura ↑ TPM	180°C (↑)	180°C (↑)	190°C (↑)
↑ Flujo de alimentación (promedio) ↓ TPM	600 kg/h (↓)	210 kg/h (↑)	490 kg/h (↓)
↑ Humedad (promedio) ↑ TPM	10-13% (↑)	5-7% (↓)	9-10% (↑)
Sistema de filtración ↓ TPM	Sí (↓)	No (↑)	No (↑)

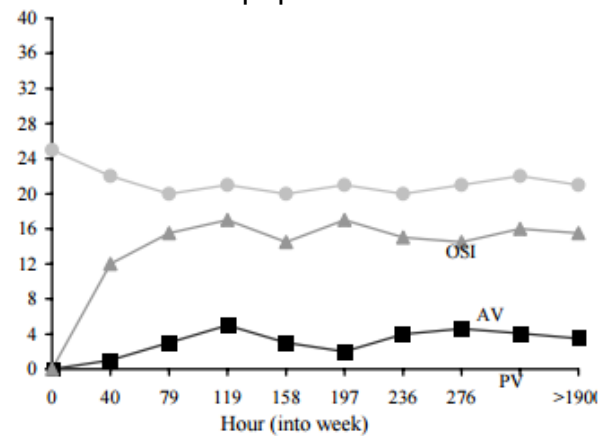
*La flecha apuntando hacia arriba indica que el factor contribuye a un incremento en los TPM y la flecha apuntando hacia abajo indica lo contrario.

Figura 23. Índice de peróxidos en aceite de palma (PO), aceite de girasol (SFO), aceite de soya (SBO) y aceite de oliva (OO)



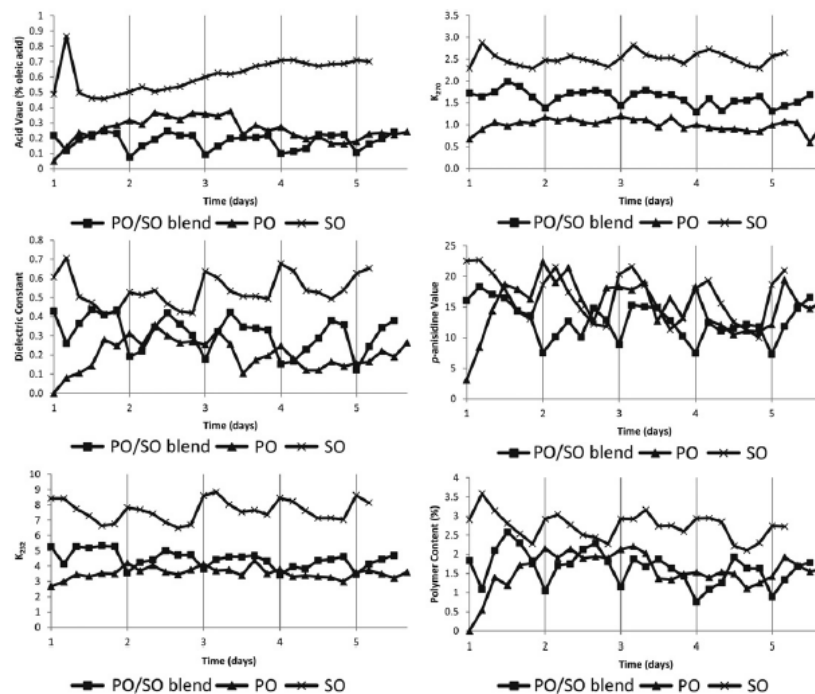
(Pantzaris, 1998)

Figura 24. Cambios en el índice de peróxidos (PV), valor de p-anisidina (AV) y OSI (Oil Stability Index) en aceite de palma durante la fritura continua de papalinas.



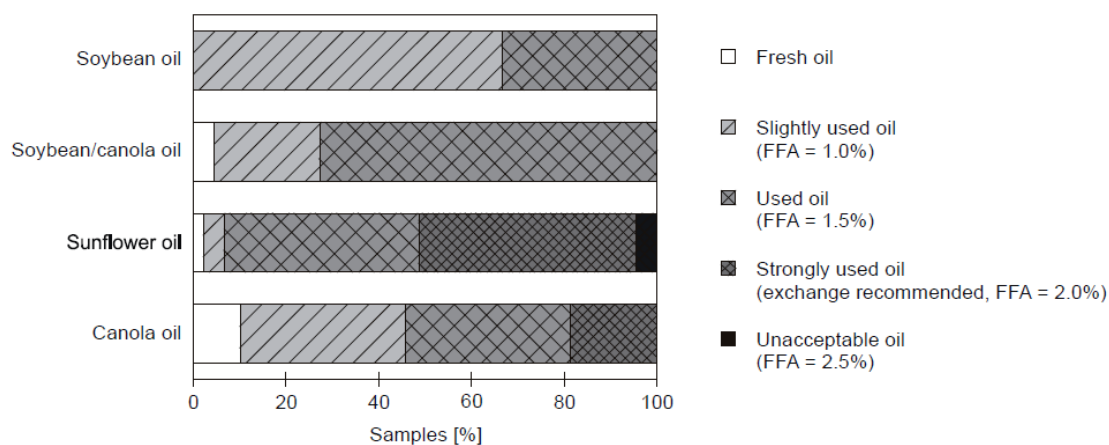
(Ismail, 2005)

Figura 25. Evolución de parámetros de calidad, durante cinco días de fritura continua en aceite de palma/girasol (40:60 v/v PO/SO), aceite de palma (PO) y de girasol (SO)



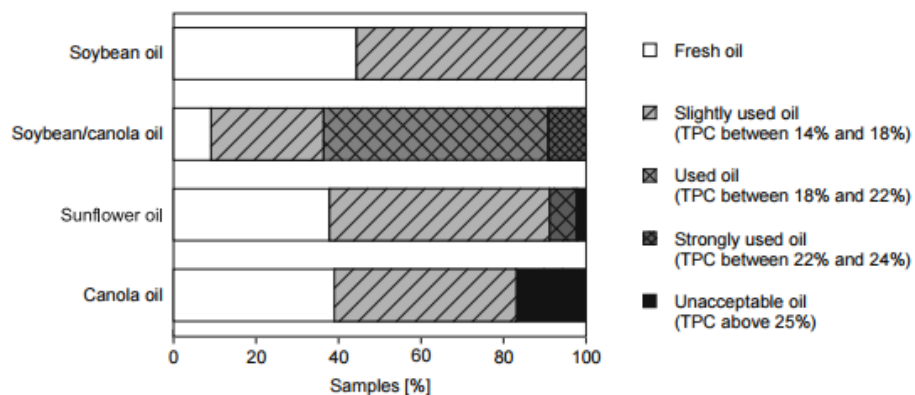
(Bou, 2012).

Figura 26. Calidad del aceite de fritura, de acuerdo al contenido de ácidos grasos libres



(Cížková, 2011).

Figura 27. Calidad del aceite de fritura, de acuerdo al contenido de compuestos polares totales



(Cížková, 2011).

Cuadro 22. Resultados de índice de ATB en muestras de aceite

Lab code	Duplicate results of the TBA value determination									
	sample A		sample B		sample C		sample D		sample E	
01	0.180	0.164	0.022	0.026	0.150	0.155	0.163	0.135	0.974*	0.803*
02	0.149	0.153	0.013	0.013	0.065	0.063	0.076	0.074	0.182	0.193
03	0.196	0.198	0.025	0.027	0.094	0.106	0.089	0.104	0.448	0.471
04	0.199	0.194	0.030	0.028	0.108	0.107	0.102	0.095	0.264	0.254
05	0.164	0.158	0.028	0.026	0.113	0.118	0.103	0.095	0.228	0.225
06	0.187*	0.159*	0.030	0.027	0.110	0.114	0.098	0.099	0.240	0.223
07	0.136	0.143	0.030	0.034	0.105	0.112	0.103	0.103	0.176	0.171
08	0.206	0.213	0.033	0.031	0.090	0.102	0.101	0.093	0.163	0.173
09	0.101	0.095	0.011	0.010	0.047	0.048	0.052	0.054	0.062	0.059
10	0.090	0.091	0.009	0.008	0.047	0.048	0.054	0.057	0.107	0.099
11	0.130	0.130	0.008	0.008	0.043	0.044	0.042	0.041	0.111	0.110
12	0.068	0.072	0.006	0.006	0.038	0.036	0.030	0.030	0.056	0.057
13	0.073	0.072	0.004	0.003	0.050	0.049	0.045	0.050	0.166	0.206
14	0.167	0.174	0.043	0.046	0.111	0.110	0.099	0.113	0.154	0.144
15	0.058	0.053	0.005	0.005	0.021	0.022	0.013	0.012	0.053	0.053
16	0.151	0.158	0.017	0.015	0.050	0.048	0.053	0.055	0.082	0.082

Note : * results eliminated on basis of the Cochran or Dixon tests

(IUPAC, 1989)

En el cuadro superior, la muestra A es aceite crudo de colza, la muestra B es aceite refinado de girasol almacenado por tres meses a temperatura ambiente, las muestras C y D son de aceite de colza refinado almacenado por 6 meses a temperatura ambiente y la muestra E es aceite de soya refinado almacenado por 9 días a 60°C.

B. Glosario de términos

1. American Oil Chemists' Society (AOCS): es una sociedad científica global para todos los individuos y corporaciones interesados en grasas, aceites, detergentes y materiales similares (AOCS, 2015).
2. Codex: Es un código alimentario cuya finalidad es garantizar alimentos inocuos y de calidad a todas las personas, en cualquier lugar. Contribuye a través de sus normas, directrices y códigos de prácticas alimentarias internacionales a la inocuidad, calidad y equidad en el comercio internacional de alimentos (Codex, 2015).
3. Coguanor: Comisión Guatemalteca de Normas, es el Organismo Nacional de Normalización cuya función es desarrollar actividades de normalización.
4. Cromatografía de columna: Técnica de separación en que una fase móvil (líquida) pasa a través de una fase estacionaria (sólida o líquida) que está retenida en un recinto cilíndrico (Valcárcel, 1988).
5. Espectrofotometría: Técnica óptica que permite obtener la concentración de un compuesto en una solución, basándose en la absorción o emisión selectiva de energía electromagnética a longitudes de onda de la región ultravioleta, visible e infrarrojo (Marcombo, 1988).
6. FDA: Food and Drug Administration, en español, Agencia de Alimentos y Medicamentos, es una agencia del gobierno de Estados Unidos que se encarga de proteger la salud pública, asegurando la inocuidad y seguridad de medicamentos, alimentos, cosméticos y dispositivos médicos (FDA, 2015).
7. FFA: Free Fatty Acids (FFA, por sus siglas en inglés) son cadenas de hidrocarburos con un grupo carboxílico, que no se encuentran unidos a otra molécula (triglicérido) (Moreira, 1999).

8. Fritura Batch: También conocida como fritura por lotes, se introduce cierta cantidad del alimento en el freidor y se fríe, sin adicionar aceite durante el proceso, ni introducir más producto hasta que no se retira el primero (Moreira, 1999).
9. Fritura continua por inmersión: El producto a freír se alimenta en una banda transportadora que recorre el freidor y se mantiene constante el nivel del tanque al existir un ingreso de aceite al freidor. El sistema de calentamiento puede ser directo (por quemador) o indirecto (por resistencias) (Moreira, 1999).
10. Hidrólisis: Reacción que ocurre durante la fritura, cuando el agua rompe el enlace éster de los triglicéridos y forma di y monoacilgliceroles, glicerol y ácidos grasos libres. La hidrólisis da como resultado la rancidez hidrolítica (EMPORT LLC, fecha desconocida).
11. IUPAC: La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés), es la autoridad mundial en nomenclatura química, terminología, métodos estandarizados de medición, pesos atómicos, entre otros (IUPAC, 2015).
12. Malonaldehído (MDA): Compuesto proveniente de ácidos grasos con tres o más dobles enlaces, que reacciona con el ácido tiobarbitúrico, en el método del ATB (Shahidi, 2005).
13. Método del ATB (ácido tiobarbitúrico): Método para evaluar el deterioro oxidativo de las grasas, que se basa en la reacción del malonaldehído y el ácido tiobarbitúrico, para formar un compuesto rosado que se mide por espectrofotometría (Shahidi, 2005).
14. Oil Stability Index (OSI): Es un método aprobado por la AOCS que determina la resistencia relativa de una grasa o aceite a la oxidación (Shahidi, 2005).

15. Oxidación: Reacción que ocurre entre el oxígeno y los dobles enlaces presentes en las cadenas de ácidos grasos insaturados (Casimir, 2012).
16. Polimerización: Degradación del aceite ocurrida durante la fritura. Los polímeros oxidativos provienen de segmentos de molécula de triacilglicerol liberadas en la oxidación, que reaccionan unas con otras. Los polímeros térmicos se forman con el exceso de calor (Shahidi, 2005).
17. Testo 270: Equipo que se utiliza para determinar el porcentaje de TPM en una muestra de aceite.
18. TPM: Total Polar Molecules o moléculas polares totales, son monoglicéridos, diglicéridos, polímeros de triglicéridos, aldehídos, cetonas y otros componentes que provienen de la degradación del aceite durante la fritura (EMPORT LLC, fecha desconocida).
19. Triglicérido: Es un esqueleto de glicerol y tres ácidos grasos (cadenas de hidrocarburos), que pueden ser iguales o diferentes entre sí (Testo AG, 2014).
20. Tasa de recambio: La capacidad de aceite del tanque de fritura en relación con el consumo promedio de aceite por hora (Boskou, 2010).



Testo 270 – Controlador de aceite de fritura

Manual de Usuario



Elaborado por Andrea Cabrera,
2015.

ÍNDICE

	Página
1. Objetivo del manual.....	1
2. Medidas de seguridad	1
3. Especificaciones del equipo	1
3.1 Uso.....	1
3.2 Datos técnicos.....	2
4. Operaciones previas al uso	4
4.1 Operaciones básicas.....	4
4.1.1 Baterías y cintas de sujeción.....	4
4.1.2 Poner en marcha el instrumento	4
4.1.3 Desconectar el instrumento	4
4.1.4 LED de alarma	5
4.2 Ajuste de límites de TPM.....	5
4.3 Limpieza	6
4.4 Calibración.....	6
4.4.1 Preparación para la calibración.....	7
4.4.2 Procedimiento para calibrar el equipo.....	7
5. Utilización del equipo.....	9

1. Objetivo del manual

El objetivo de este documento es que el usuario se familiarice con el equipo TESTO 270 de medición de compuestos polares totales (TPM), incluyendo las medidas de seguridad, las especificaciones del equipo, configuración, calibración y uso del mismo.

2. Medidas de seguridad

- No opere este instrumento si hay señales de daño en el exterior o en la red eléctrica.
- Transportar y almacenar el equipo exclusivamente en el estuche de aluminio, para evitar daños en el sensor
- No exponga el mango a temperaturas mayores a 70°C.
- No almacenar el equipo junto a solventes

3. Especificaciones del equipo

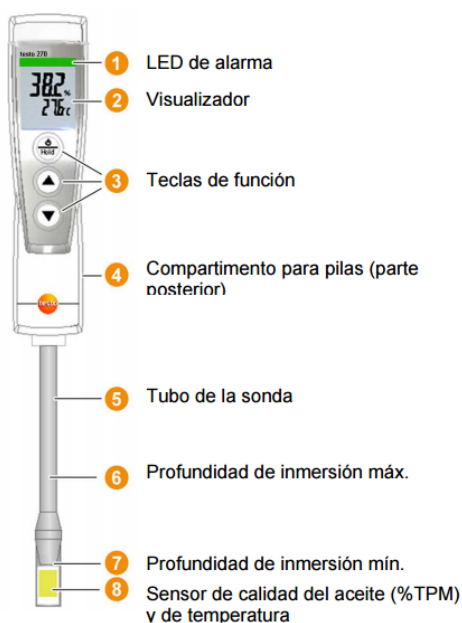
3.1 Uso. El equipo TESTO 270 es un instrumento para inspección rápida de aceites de fritura, que mide los compuestos polares totales en el aceite, como índice del estado de degradación del mismo. El sensor del equipo determina la temperatura de la muestra, y el porcentaje de compuestos polares totales.

Tomar en consideración que la temperatura del aceite de fritura debe ser como mínimo 40°C para que se realice la lectura. La temperatura de operación máxima del equipo es de 200°C.






3.2 Datos técnicos

Característica	Valor
Rango de medición	Temperatura: 40-200°C TPM: 0.5 – 40%
Exactitud	Temperatura: $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ TPM: $\pm 2\%$ (40-190°C)
Resolución	Temperatura: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ TPM: $\pm 0.5\%$
Fuente de energía	Dos baterías AAA (vida útil de aproximadamente 500 mediciones)
Tiempo de respuesta	< 30 s
Peso	164 g
Dimensiones	354 mm x 50 mm x 30 mm




Visión global del instrumento Testo 270



Íconos en el visualizador

Ícono	Función/característica
	Rango de medición de temperatura excedido
	Rango de medición de temperatura no alcanzado
	LED de alarma activado
	Carga de baterías baja (aproximadamente 3 horas restantes)
	Carga de baterías agotada (aproximadamente 1.5 horas restantes)
Alarm	Valor límite superior de TPM excedido
Hold	Valores de medición retenidos (manualmente)
Auto-Hold	Valores de medición retenidos (automáticamente)
°C/°F	Temperatura en °C o °F

Teclas de función

Tecla	Función/característica
[/Hold]	<ul style="list-style-type: none"> • Poner en marcha y desconectar el equipo • Retener los valores de medición manualmente • Configurar el equipo
[]	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustar el valor límite superior de TPM • Configurar el instrumento
[]	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustar el valor límite inferior de TPM • Configurar el instrumento

4. Operaciones previas al uso

4.1 Operaciones básicas

4.1.1. Baterías y cinta de sujeción

- El equipo utiliza baterías AAA y cuenta con una cinta de sujeción que se hace pasar con cuidado por el tubo de sonda y permite proteger el equipo durante la medición.



4.1.2. Poner en marcha el instrumento

- Pulsar [🔌/Hold] (< 1 s)
- Todos los segmentos se iluminan
- El instrumento cambia al modo de medición y está listo para usarse

4.1.3. Desconectar el instrumento

- Presionar [🔌/Hold] (3 s)
- El visualizador se apaga y el instrumento se desconecta

4.1.4. LED de alarma

Indica en qué rango se encuentra el valor de TPM medido:

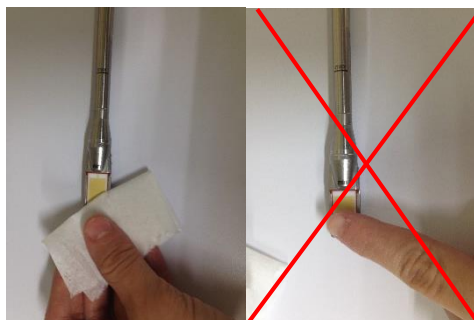
Verde	El valor de TPM está por debajo del límite inferior
Anaranjado	El valor de TPM está entre el límite inferior y superior
Rojo	El valor de TPM está por encima del límite superior

4.2 Ajuste de límites de TPM.

- El instrumento se puede ajustar con valores de TPM entre 4-40%, el valor del límite superior debe ser mínimo 1% más alto que el límite inferior
- Para el límite inferior:
 - Presionar [▲] durante 2 s.
 - Se observará **High Alarm** y el valor límite superior ajustado en la pantalla
 - Ajustar el valor límite superior con [▲] o [▼]
 - Confirmar con [⏻/Hold].
 - El instrumento cambia al modo de medición y está listo para usar.
- Para el límite superior:
 - Presionar [▼] durante 2 s.
 - Se observará **Low Alarm** y el valor límite inferior ajustado en la pantalla
 - Ajustar el valor límite superior con [▲] o [▼]
 - Confirmar con [⏻/Hold].
 - El instrumento cambia al modo de medición y está listo para usar.

4.3 Limpieza

- Antes de la limpieza, asegurarse que el instrumento se enfríe suficientemente, ya que hay peligro de quemaduras debido a partes calientes del equipo
- No utilizar objetos puntiagudos ni disolventes agresivos para la limpieza
- Utilizar detergentes suaves, lavavajillas convencionales, agua o soluciones de jabón
- Limpiar el sensor con un paño de papel suave y con cuidado lavarlo bajo agua corriente
- En caso de restos de aceite fríos en el sensor, sumergirlo en agua caliente, dejarlo enfriar y limpiarlo antes de que los residuos de aceite se enfríen



4.4 Calibración

- Permite comprobar la exactitud del instrumento, haciendo una medición comparativa con el aceite de referencia Testo. Si el valor de medición difiere demasiado del valor de referencia, se puede realizar un ajuste.

4.4.1 Preparación para la calibración

- Limpiar el sensor (ver sección 5.3)
- Calentar el aceite de referencia a baño María, a una temperatura de 20-25°C para calibración y de 50°C para ajuste. Tener precaución de que no llegue agua al aceite de referencia



4.4.2 Procedimiento para calibrar el equipo

- Encender el equipo y al mostrar la pantalla inicial, presionar simultáneamente **[⏻/Hold]** y **[▲]** durante 3 segundos.
- Presionar varias veces **[⏻/Hold]** hasta que en la pantalla aparezca **CAL** y **on** u **OFF**



- Poner en marcha la función de calibración confirmando con **[⏻/Hold]**. Se observará **OIL** y **CAL** en la pantalla



- Sumergir el sensor en el aceite de referencia, tomando en cuenta la profundidad de inmersión. Colocar el aceite de referencia en una superficie sólida, ya que la exactitud de la calibración se ve influida negativamente si el frasco del aceite de referencia se sostiene en la mano.



- Iniciar el proceso de calibración con **[⏻/Hold]**, para una lectura más rápida mover el sensor en el aceite. Se mostrará en la pantalla el valor de TPM medido y la temperatura.



- Comparar el valor mostrado en la pantalla con el que se indica en la etiqueta del frasco de aceite de referencia. Si la variación es mayor del 1% se debe realizar un ajuste, ajustando el valor de TPM al valor indicado en la etiqueta, utilizando las teclas [▲] o [▼] según sea necesario. Si no es necesario hacer ajuste (variación menor al 1%), seguir con el paso siguiente.



- Confirmar con [⏻/Hold]. Se mostrará **rSt** y **on** u **OFF** en la pantalla, utilizando las teclas [▲] o [▼] seleccionar **OFF** y confirmar con [⏻/Hold].



5. Utilización del equipo

- Extraer una muestra de aceite y esperar 5 minutos antes de realizar la medición y limpiar el sensor previo a la medición
- Presionar [⏻/Hold] para encender el equipo. Sumergir el sensor en el aceite de fritura. Observar la profundidad de la inmersión.
- Si la temperatura está dentro del rango de medición (40-200°C), esperar el tiempo de estabilización (aproximadamente 20 segundos)

- Se muestra el valor de la medición, esta finaliza cuando la temperatura visualizada ya no varía.
- Leer el valor de medición
- Para medir otra muestra, pulsar **[⏻/Hold]** brevemente (menos de 1 segundo).

(Manual adaptado de Testo AG, 2014).