



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Efecto de las condiciones de la evaporación
al vacío y pasteurización por microondas
sobre las características de jugos cítricos**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA

Gian Carlo Izazaga Romero

ASESOR: Dra. María Elena Vargas Ugalde

COASESOR: M. en C. Julieta González Sánchez

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis**

Efecto de las condiciones de la evaporación al vacío y pasteurización por microondas sobre las características de jugos cítricos

Que presenta el pasante: **Gian Carlo Izazaga Romero**

Con número de cuenta: **309670889** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 29 de Agosto de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. María Elena Vargas Ugalde	
VOCAL	I.A. Francisco Javier López Martínez	
SECRETARIO	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	
1er. SUPLENTE	I.Q.I Ada Josefa Meza Meza	
2do. SUPLENTE	Q.F.B. Jonathan Pablo Paredes Juárez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/javg

Dedicatorias

A mi hermano Ross, que es lo mejor que me ha dado la vida, en las buenas y en las malas, siempre estuviste para ayudarme, para darme un hombro en que llorar, para darme la mano cuando me caía, para darnos ese amor que solo entre nosotros existe, por todas las aventuras que tuvimos y tendremos, por ser Del Piero en mi Juventus, el Charizard de mi equipo, el Luigi Rojo de mi Mario Verde, gracias por todo.

A mi madre Enriqueta, por darme todo su amor y comprensión, que, aunque a veces sobreprotectora, siempre quiso lo mejor para mí y me enseñó a ser buenos con todos sin mirar a quien, ¡te amo mucho más!

A mi padre Rosamber, por apoyarme, por tenerme paciencia, por enseñarme que las cosas se hacen bien o no se hacen, por darme todo lo que de pequeño quise, que, aunque nunca ha sido muy expresivo, sé que me ama y solo desea lo mejor para mí, ¡te amo mucho más!

A mis sobrinos Renata, Fernanda e Ethan, por darme alegrías y recordarme que nunca se envejece en el alma, ¡los adoro pequeños!

A los Sánchez Romero, por siempre ponerme una sonrisa en la cara, por motivarme, por escucharme, por entenderme, por enseñarme que a pesar de que todos pensamos diferente, el amor por la familia lo puede todo.

A los Izazaga Álvarez, por respetar mis ideas y forma de ser, por darme cariño y velar por mí, a su propio estilo y manera.

A todos mis amigos, que constantemente estuvieron para mí, por su ayuda, por todo lo que nos divertimos, por todas las excentricidades que me aguantaron, y por ser mi segunda familia, agradecimientos especiales para Yarabi, Ivis, Sergio, Helia, Ara, Ana Gabriela, ¡son los mejores!

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas, acobijarme como uno de los suyos, por enseñarme a pelear por mí mismo, a hacer respetar mis ideas, por dejarme demostrar que puedo ser mejor.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por ser mi alma mater, por dejarme conocer a personas importantes de mi vida, por formarme como Ingeniero, por darme experiencias y anécdotas que recordare con mucho cariño.

A mi asesora Dra. María Elena Vargas Ugalde, por apoyarme en los últimos años de mi vida como estudiante, por orientarme, ayudarme y brindarme su amistad. Male, no tengo nada más que darte la gracias, por todo lo que has hecho por mí, te lo digo de corazón.

A mi coasesora M.enC. Julieta González Sánchez, por darme sus consejos, por sus enseñanzas, por ayudarme a ser más dedicado y esmerarme en lo que hago. Juli, gracias por todo!

A mis sinodales, por el tiempo y la disposición invertidos y en la revisión de este trabajo de tesis, por sus asesorías y recomendaciones.

A mis profesores, por darme sus consejos, brindarme sus conocimientos, orientarme y escucharme, por abrirme la mente y observar como cada año me convertía en el Ingeniero que soy ahora, quisiera mencionar a Víctor Avalos (Q.E.P.D), Laura Cortázar, Edith Fuentes, Francisco López, Virginia Delgado, Saturnino Maya, Antonio Trejo, por inspirarme y darme su amistad.

Este trabajo se realizó con el apoyo financiero del proyecto DGAPA PAPIME PE208917.

Índice

Resumen	1
Introducción.	2
Capítulo I. Antecedentes.	4
1.1 Jugo de frutas	4
1.1.1 Jugo de naranja.	5
1.1.2 Jugo de mandarina.	6
1.1.3 Efecto de la temperatura en las propiedades de los jugos cítricos.	7
1.2 Evaporación.	9
1.2.1 Equipos de evaporación.	10
1.2.2 Factores que afectan el proceso de evaporación al vacío	14
1.2.3 Transferencia de masa y calor en la evaporación.	15
1.3 Pasteurización.	18
1.3.1 Tipos de pasteurización.	19
1.3.1.1 Pasteurización por microondas.	21
Capítulo II.- Metodología Experimental.	25
2.1 Objetivo	25
2.2 Objetivos particulares	25
2.3 Variables del proceso.	25
2.4 Materiales y métodos.	26
2.4.1 Preparación de la muestra.	26
2.4.2 Medición de color.	26
2.4.3 Medición de pH.	27
2.4.4 Medición de acidez.	27

2.4.5 Determinación de ácido ascórbico.	27
2.4.6 Perfil de temperatura.	28
2.4.7 Actividad enzimática.	28
2.4.8 Balances de materia y energía.	29
Capitulo III. Análisis de resultados.	31
3.1 Objetivo particular 1.	31
3.2 Objetivo particular 2.	35
3.2.1 Cambio de color.	35
3.2.2 Cambios de pH y acidez.	38
3.2.3 Efecto sobre la vitamina C.	39
3.3 Objetivo particular 3.	40
Conclusiones	42
Observaciones y Recomendaciones	43
Referencias	44

Índice de Figuras

Figura 1. Estructura química de la hesperidina	8
Figura 2. Diseño básico de un evaporador al vacío	12
Figura 3. Transferencia de calor en un evaporador (16
Figura 4. Condiciones para el balance.	29
Figura 5. Perfil de Temperatura	31
Figura 6. Tiempo de calentamiento "CUT" en el horno de microondas.	32
Figura 7. Actividad residual de PME.	34
Figura 8. Índice de pardeamiento.	36
Figura 9. Cambio total de color	37
Figura 10. Efecto sobre la acidez	38

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Composición proximal del jugo de naranja	5
Cuadro 2. Composición proximal del jugo de mandarina	6
Cuadro 3. Principales factores a considerar durante el tratamiento térmico de jugos cítricos	7
Cuadro 4. Evaporadores usados en la industria alimentaria	11
Cuadro 5. Comparación de la actividad residual de PME entre distintos procesos	35
Cuadro 6. pH de los jugos en diferente etapa del proceso.	39
Cuadro 7. Contenido de Ácido Ascórbico.	39
Cuadro 8. Energía gastada durante la experimentación	40

Resumen

La aplicación de nuevas tecnologías en tratamientos térmicos como la pasteurización por microondas son de reciente interés, así como su empleo con otros tratamientos como la evaporación al vacío. Se investigó el efecto de las condiciones de operación de dichos procesos en jugos de naranja y mandarina con relación a los cambios de color y contenido de vitamina C.

El objetivo de la pasteurización fue la inactivación de la Pectinmetilesterasa (PME), la cual se inactivó de un 80% a 95.75% bajo diferentes condiciones de proceso.

Se encontró que a mayor tamaño de partícula se requiere mayor energía para realizar la evaporación.

La combinación de los dos procesos ocasionó un menor efecto térmico sobre los componentes termolábiles de los jugos, que emplear únicamente pasteurización.

Introducción.

En épocas recientes, la producción de jugos cítricos aumentó debido a que son excelentes fuentes de vitaminas, minerales, fibras y antioxidantes como los compuestos fenólicos, que son efectivos en la prevención de enfermedades cardiovasculares, varios tipos de cánceres y diabetes. La pectina, es un polisacárido importante en la calidad para la elaboración de jugos, ya que da estabilidad a la suspensión de coloides conocida como “nube” además de dar la apariencia de turbidez, que se vuelve una característica deseable en esta clase de productos. La pectinmetilesterasa (PME), también conocida como pectinasa, pectina esterasa o pectin metoxilasa, es una enzima que influye en la estabilidad de la “nube”, viscosidad, color, sabor y la palatabilidad de los jugos cítricos. Debido a esto, la inactivación de la PME es introducida como un parámetro de pasteurización en jugos cítricos ya que su resistencia térmica es mayor a comparación de los microorganismos encargados de la putrefacción de los alimentos (Aghajanzadeh & Mohammad, 2018). Estos son procesados a altas temperaturas para lograr la pasteurización, pero los efectos de esta clase de procesamientos térmicos causan pérdidas en aspectos de calidad, debido a los componentes volátiles como la mayoría de complejos solubles (azúcares, ácidos, flavonoides) y compuestos aromáticos (en su mayoría mono y sesquiterpenos) (Akyldiz & Ağçam, 2014; Wei et al., 2018). El uso de tecnologías emergentes y tratamientos no térmicos para la pasteurización de jugos ha aumentado en años recientes, buscando disminuir las pérdidas de calidad de los jugos respecto a sus compuestos volátiles, Demirdöven & Bayasal (2016) pasteurizaron jugo de toronja mediante microondas (3000 W, 2.45 GHz, 60 a 85°C) observando una mayor inactivación de PME en comparación con un tratamiento térmico convencional. Considerando las demandas actuales de los consumidores de jugos comerciales que parezcan “recién procesados” se ha dado pie a la combinación de procesos térmicos y no térmicos con otras tecnologías buscando efectos sinérgicos para una mayor inactivación enzimática, además de tener una mejor preservación de la calidad de los jugos frescos, por lo que el objetivo de este trabajo es observar el efecto de la pasteurización por microondas en

conjunto con la evaporación al vacío en las características de jugos de naranja y mandarina para establecer condiciones de procesamiento con el menor efecto sobre los componentes termolábiles.

Capítulo I. Antecedentes.

1.1 Jugo de frutas

Según la norma STAN 247-2005 del Codex Alimentarius, se define el jugo de frutas como el líquido sin fermentar (pero fermentable) que se obtiene de la parte comestible de frutas en buen estado, debidamente maduras y frescas o frutas que se han mantenido en buen estado por procedimientos adecuados, inclusive por tratamientos de superficie aplicados después de la cosecha de conformidad con las disposiciones pertinentes de la comisión del Codex Alimentarius.

La industria de los cítricos adquirió un interés creciente a mediados del año 1940, debido principalmente a la introducción de procesos modernos de extracción de jugo. Desde entonces, el mercado para el jugo de frutas y su consumo, así como sus oportunidades de venta se han ido incrementando alrededor del mundo. El incremento de la popularidad de las bebidas cítricas entre los consumidores, junto con la importancia que los investigadores le dan a los cítricos, han guiado a un desarrollo impactante en el mercado. El desarrollo de dos tecnologías, como son los extractores de jugos automáticos y los procesos de concentración, fueron los más importantes para el crecimiento rápido en la industria. Hoy en día, ingenieros y técnicos han tenido un creciente interés en elaborar nuevos productos a partir de cítricos, para incrementar la cantidad de compuestos valiosos obtenibles, para mejorar la calidad de dichos compuestos y para automatizar y optimizar los procesos tradicionales (Pecoroni et al, 2017).

En años recientes, México ha sido uno de los principales exportadores de jugo de fruta (mayoritariamente jugo de naranja), siendo Estados Unidos su mayor importador, donde México ha aumentado su volumen de exportación año con año, con un incremento del 16%, de 451225 toneladas durante el periodo de octubre del 2015 a septiembre del 2016, a 522712 toneladas durante el periodo de octubre de 2016 a septiembre de 2017 (Fruit Juice Focus, 2017).

Los jugos deben prepararse mediante procedimientos que mantengan las características físicas, químicas, organolépticas y nutrimentales esenciales de la fruta de que procede. (NOM-173-SCFI-2009).

1.1.1 Jugo de naranja.

El jugo de naranja o zumo de naranja es un jugo de frutas en forma de líquido obtenido de exprimir el interior de las naranjas, es el jugo de fruta más consumido alrededor del mundo. Se obtiene del endocarpio de las frutas del *Citrus Sinesis*. Muchas variedades de naranja se cultivan para hacer jugo de naranja, dentro de las cuales se encuentran las variedades Halmin, Piña, Valencia y Pera (Chanson-Rolle et al, 2016). La SAGARPA (2017) informó que México se consolidó como el quinto productor mundial de naranja en 2017, con un volumen promedio de 4.2 millones de toneladas, las cuales se comercializaron tanto en el mercado interno como a nivel internacional, donde su valor de producción se estima en más de seis mil millones de pesos. El jugo de naranja contiene varios micronutrientes como la vitamina C, ácido fólico y polifenoles, que es la principal forma de obtener dichos nutrimentos (Chanson-Rolle et al, 2016), en el Cuadro 1 se muestra la composición química general del jugo de naranja:

Cuadro 1. Composición proximal del jugo de naranja (USDA, 2017)

Composición	Porcentaje (%)
Agua	88.30
Proteína	0.70
Lípidos	0.20
Carbohidratos	10.40
Fibra	0.2
Vitaminas	Cantidad por 100ml (mg)
Vitamina C	50
Vitamina A	0.01
Vitamina E (alfa-tocoferol)	0.04
Minerales	Cantidad por 100ml (mg)
Calcio	11
Fierro	0.20
Sodio	1

1.1.2 Jugo de mandarina.

El jugo de mandarina se obtiene a partir del *Citrus retícula blanco*, que son una clase de naranjas con una cascara delgada, el nombre “tangerina” se puede aplicar como nombre alternativo para la clase entera, pero en el mercado, es comúnmente usada para los tipos de mandarina con cascara roja-naranja. La mandarina y sus subsecuentes productos se caracterizan por una cáscara y pulpa brillantes y coloridas, excelente sabor, cascara fácil de remover, y segmentos que se separan fácilmente (Akyildiz & Ağçam, 2014). En comparación con la naranja, las mandarinas tienen una menor cantidad de vitamina C, se han reportado casos donde las mandarinas llegan a tener mayor contenido de vitamina C debido al grado de madurez de estas (Littley, 2017), además de ser buena fuente de vitaminas A y E, como se muestra en el Cuadro 2:

Cuadro 2. Composición proximal del jugo de mandarina (USDA,2017)

Composición	Porcentaje (%)
Agua	88.90
Proteína	0.50
Lípidos	0.20
Carbohidratos	10.10
Fibra	0.2
Vitaminas	Cantidad por 100ml (mg)
Vitamina C	31
Vitamina A	0.013
Vitamina E (alfa-tocoferol)	0.13
Minerales	Cantidad por 100ml (mg)
Calcio	18
Fierro	0.20
Sodio	1

1.1.3 Efecto de la temperatura en las propiedades de los jugos cítricos.

Para asegurar la calidad de los jugos cítricos, normalmente se deben tener en consideración ciertos factores, como se indica en el Cuadro 3. Sin embargo, el efecto de la temperatura en los procesamientos térmicos tiene impactos negativos en la calidad del jugo de naranja como lo es la pérdida del color a “fresco”, el sabor y el valor nutrimental.

Cuadro 3. Principales factores a considerar durante el tratamiento térmico de jugos cítricos (Akyldiz & Agcam, 2014)

<p>Sólidos Solubles (°Brix): Son principalmente azúcares (Sacarosa, Fructuosa y Glucosa). Tanto el ácido ascórbico y cítrico como los minerales en el jugo contribuyen a los sólidos solubles.</p>	<p>Acidad (Acidez titulable): El ácido cítrico es el que se produce de manera natural en los cítricos. Existen pequeñas cantidades de ácido málico y ácido tartárico presente.</p>
<p>Relación °Brix/Acido: Dependen del cultivar y de la madurez para obtener una buena calidad. Este valor no cambia después de la cosecha, porque los cítricos no maduran después de la cosecha.</p>	<p>El color del jugo: El rango de color naranja-amarillo de los jugos es debido a los carotenos encontrados en el flavedo (cáscara exterior de la naranja), la cáscara y en las vesículas que son procesadas durante la elaboración del jugo. El rango de colores que se ven en el jugo de naranja se da debido al cultivar, la temporada, el método de proceso y la madurez de la fruta.</p>
<p>Rendimiento del jugo</p>	
<p>Buen Sabor</p>	
<p>Bajo nivel de componentes amargos</p>	<p>Potencial actividad de las Pectinmetilesterasas (PME)</p>

Por ejemplo, la hesperidina y la naringina, pertenecen al grupo de compuestos llamados flavonoides. A diferencia de la naringina, la hesperidina es el principal flavonoide en los jugos de naranja y mandarina, sin embargo, no imparte sabor alguno a los zumos de cítricos. Esta se encuentra principalmente en la membrana y corteza de la fruta. No es soluble en disoluciones acuosas neutras y es poco soluble en disoluciones ácidas, como los jugos cítricos. La extracción del jugo de la fruta pone a la hesperidina en contacto con el jugo ácido y esto ocasiona su cristalización en forma de cristales largos y delgados que se pueden observar al

microscopio. La concentración del jugo durante la evaporación acelera la cristalización de la hesperidina (Figura 1), favoreciendo la presencia de copos blancos en el zumo concentrado o reconstituido (Kimball, 2002).

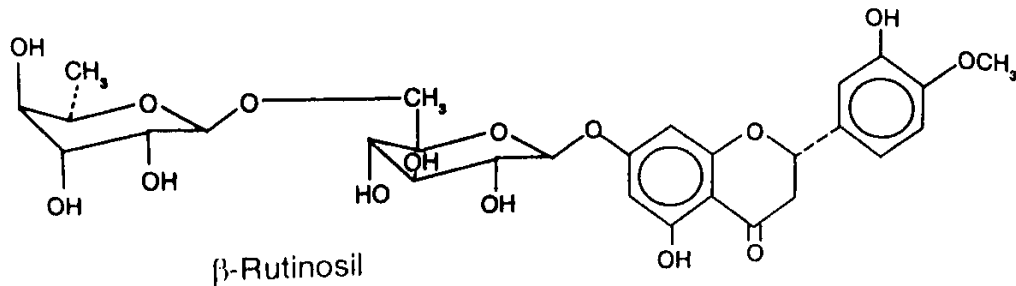


Figura 1. Estructura química de la hesperidina (Kimball, 2002)

Cualquier alimento que contenga componentes muy oxidables, como los hidratos de carbono y el ácido ascórbico, son susceptibles a la oxidación. La oxidación se puede producir mediante diversos mecanismos, pero la oxidación catalizada es normalmente la más rápida y por lo tanto la que más preocupa a la industria alimentaria. La oxidación de los jugos cítricos produce alteraciones del sabor y el color, generalmente, las alteraciones de los sabores son más preocupantes, ya que se producen antes de la alteración de color.

Uno de los principales problemas al procesar alimentos mediante altas temperaturas, es la pérdida de compuestos de impacto, sustancias químicas responsables de proveer la identidad sensorial -principalmente olor y sabor – a los alimentos. Estas son mezclas complejas de compuestos volátiles, los cuales se van desarrollando durante el crecimiento y la maduración de los frutos. Se ha identificado que una compleja combinación de terpenos, aldehídos, ésteres y alcoholes en ciertas proporciones, son los responsables del sabor de la naranja, mientras que los compuestos aromáticos más activos incluyen al sesquiterpeno aldehído β-sinensal, octanal y decanal. Para los sabores de la mandarina se tienen

identificados al metil antranilato y al timol, con la contribución del β -pineno y γ -terpineno para la parte aromática (McGorin, 2002).

Durante la evaporación, algunos componentes se pierden en mayor cantidad que otros y, en consecuencia, el tono del aroma característico de los jugos puede alterarse cuando se concentra. Por ejemplo, en el jugo de piña se requiere un 80% de la evaporación para eliminar 90% de los ésteres, pero el 90% de los carbonilos se pierde cuando sólo se ha evaporado el 47% del jugo (Kinball,2002).

1.2 Evaporación.

El calentamiento y enfriamiento de alimentos son probablemente los procesos que ocurren más frecuentemente en una planta de procesamiento de alimentos, y solo un pequeño porcentaje de alimentos procesados no ha recibido algún tratamiento donde se involucra la transferencia de calor (Ibraz, 2005).

La evaporación es una operación unitaria que consiste en la eliminación de agua de un alimento fluido mediante vaporización o ebullición. Son varios los alimentos que se obtienen en forma de soluciones acuosas, y que para facilitar su conservación y transporte se concentran en una etapa de eliminación de agua. Esta eliminación puede realizarse de diferentes formas, aunque es la evaporación uno de los métodos más utilizados (Geankoplis, 1998).

La evaporación difiere del secado en que el residuo es un líquido (a veces muy viscoso) en vez de un sólido; de la destilación en que el vapor es un sólo componente, y aunque sea una mezcla, en la evaporación no se pretende separar el vapor en fracciones; de la cristalización en que el interés consiste en concentrar una solución y no en la formación de cristales. Entre los ejemplos típicos de procesos de evaporación están la concentración de soluciones acuosas de azúcar, cloruro de sodio, hidróxido de sodio, glicerina, gomas, leche y jugo de naranja. En estos casos, la solución concentrada es el producto deseado y el agua evaporada suele desecharse (Geankoplis, 1998).

1.2.1 Equipos de evaporación.

Se emplean muchos tipos de evaporadores para la concentración de alimentos líquidos. Los principales factores que afectan al elegir un equipo de evaporación son la calidad del alimento, la capacidad de evaporación, y las consideraciones acerca del costo energético. La calidad del alimento depende principalmente del tiempo de residencia y la temperatura en conjunto en el evaporador (Geankoplis, 1998).

Un evaporador consta de dos cámaras, una de condensación y otra de evaporación. En la condensación, el vapor de agua se transforma en líquido, con lo que cede su calor latente de condensación, el cual es captado en la cámara de evaporación por el alimento, del que se desea eliminar el agua. El agua evaporada abandona la cámara de evaporación a la temperatura de ebullición, al mismo tiempo que se obtiene una corriente de solución concentrada.

Una de las formas más fáciles de clasificar a los evaporadores es en función al método de calentamiento (Freese, 2014), entre los que se encuentran:

- 1.-El medio de calentamiento está separado del líquido a evaporar por superficies de calentamiento tubulares.
- 2.-El medio de calentamiento está confinado ya sea por dobles paredes, chaquetas, placas planas, bobinas, etc.
- 3.- El medio de calentamiento está en contacto directo con el líquido a evaporar (un ejemplo son los evaporadores de combustión sumergida)
- 4.- Calentamiento mediante radiación solar.

La mayoría de los evaporadores usados en la industria se encuentran dentro de la primera categoría, teniendo tubos de calentamiento superficial. En los evaporadores de circulación natural, el movimiento del líquido a través del medio de calentamiento es inducido por el mismo proceso de ebullición, pero para líquidos más viscosos, que contienen un alto contenido de sólidos o líquidos que tienden a reaccionar o ensuciarse en el medio de calentamiento, se emplean evaporadores con circulación

forzada, los cuales disponen de una bomba que circula el líquido a través del medio de calentamiento a una mayor velocidad que la posible por circulación natural (Freese, 2014). En el Cuadro 4, se muestran los tipos de evaporadores más usados para concentrar alimentos líquidos:

Cuadro 4. Evaporadores usados en la industria alimentaria (Singh, P. & Heldman, D., 2014)

Tipo de Evaporador	Capacidad Viscosa (x10 ⁻³ Pa s)	Capacidad de manejar sólido suspendido	Aplicación de múltiple efecto	Capacidad de transferencia de calor	Tiempos de residencia	Costo
Tubos Verticales	Hasta 50	Si	Si	Media	Alta	Bajo
Intercambiador de calor de placas	Hasta 500	Limitada	Si	Buena	Media	Medio
Tubos Verticales de Película ascendente	Hasta 1000	No deseable	Si	Buena	Baja	Medio
Tubos Verticales de película descendente	Hasta 3000	No deseable	Si	Excelente	Muy baja	Medio
Intercambiador de superficie raspada	Hasta 10,000	Si	No	Excelente	Baja	Muy Alto

1.2.1.1 Evaporación al vacío.

El proceso de tratamiento por evaporación al vacío consiste en reducir la presión interior de la cámara de evaporación por debajo de la presión atmosférica. Esto reduce el punto de ebullición del líquido a evaporar, reduciendo o eliminando de este modo la necesidad de calor en los procesos de ebullición y condensación (Simpson, 2019).

En 1813, E.C. Howard inventó la "vacuum pan", un recipiente cerrado (Figura 2), calentado por camisa, conectado a un condensador y una bomba de vacío. Este tipo de evaporador se sigue utilizando para la evaporación a vacío a pequeña escala en la elaboración de salsas, por ejemplo.

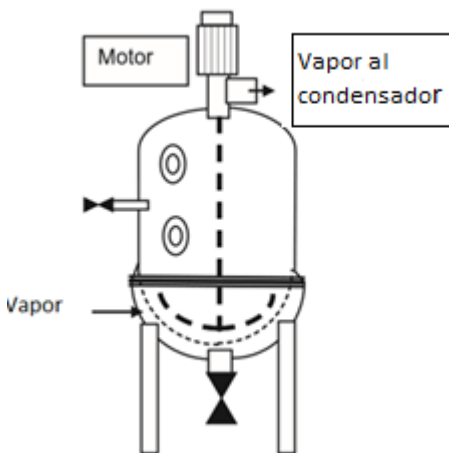


Figura 2. Diseño básico de un evaporador al vacío (Gutiérrez, G. et al, 2007)

Cuando el proceso se aplica a los alimentos y el agua se evapora y se elimina, los alimentos se pueden almacenar durante largos períodos de tiempo. También se utiliza cuando la ebullición de una sustancia a temperaturas normales cambiaría químicamente la consistencia del producto, como las claras de huevo coagulando cuando se intenta deshidratar la albúmina en un polvo.

Este proceso se utiliza industrialmente para fabricar productos alimenticios tales como leche evaporada, chocolate con leche y pasta de tomate para ketchup. En la industria del azúcar se utiliza la evaporación al vacío en la cristalización de soluciones de sacarosa. Tradicionalmente, este proceso se llevó a cabo en modo discontinuo, pero hoy en día se dispone de bandejas de vacío continuas (Gutiérrez, G. et al, 2007).

Los evaporadores de simple efecto al vacío contienen los siguientes componentes:

1. Un intercambiador de calor, conocido como calandria, el cual provee del calor sensible y latente necesario para llevar a cabo la evaporación. El medio de calentamiento usado es vapor saturado, pero también puede emplearse agua caliente o algún otro fluido térmico.
2. Un dispositivo que separa el vapor de la fase líquida concentrada. En evaporadores al vacío, se usan dispositivos mecánicos como cámaras con baffles o separadores de ciclón para reducir las pérdidas.
3. Un condensador que convierte el vapor de nuevo a líquido y una bomba, inyector de vapor, y un medidor barométrico para medir y remover el condensado, para poder mantener el vacío.

El método más común de evaporación usado en la industria es la evaporación al vacío. Se han desarrollado técnicas de calentamiento alternativo para prevenir la formación de componentes no deseados y minimizar pérdidas de calidad durante la evaporación al vacío. Adicionalmente, se han integrado sistemas por microondas a los procesos de evaporación al vacío para usar la energía más eficientemente y caracterizar el cambio del contenido total de sólidos solubles durante el periodo de evaporación (Assawarachan & Noomhorm, 2012).

1.2.2 Factores que afectan el proceso de evaporación al vacío

Las propiedades físicas y químicas de la solución que se está concentrando y del vapor que se separa tienen un efecto considerable sobre el tipo de evaporador que debe usarse y sobre la presión y la temperatura del proceso. Algunas propiedades que afectan a los métodos de procesamiento son (Geankoplis, 1998):

1. **Concentración en el líquido.** Por lo general, la alimentación líquida a un evaporador es bastante diluida, por lo que su viscosidad bastante baja, es similar a la del agua y se opera con coeficientes de transferencia de calor bastante altos. A medida que se comprueba la evaporación, la solución se concentra y su viscosidad puede elevarse notablemente, causando una marcada disminución del coeficiente de transferencia de calor. Se requiere entonces una circulación o turbulencia adecuada para evitar que el coeficiente se reduzca demasiado.
2. **Solubilidad.** A medida que se calienta la solución y aumenta la concentración del soluto o sal, puede excederse el límite de solubilidad del material en solución y se formaran cristales. Esto limita la concentración máxima que puede obtenerse por evaporación de la solución. En la mayoría de los casos, la solubilidad de la sal aumenta con la temperatura.
3. **Sensibilidad térmica de los materiales.** Muchos productos, en especial los alimentos y otros materiales biológicos, son sensibles a la temperatura y se degradan cuando ésta sube o el calentamiento es muy prolongado. Entre ellos están materiales farmacéuticos, productos alimenticios como leche, jugo de naranja y extractos vegetales; y materiales químicos orgánicos delicados. La cantidad de degradación está en función de la temperatura y del tiempo.
4. **Formación de espumas.** En algunos casos, los materiales constituidos por soluciones cáusticas, soluciones de alimentos como leche desnatada y algunas soluciones de ácidos grasos, forman espuma durante la ebullición.

5. **Presión y temperatura.** El punto de ebullición de la solución está relacionado con la presión del sistema. Cuanto más elevada sea la presión de operación del evaporador, mayor será la temperatura de ebullición. Además, la temperatura de ebullición también se eleva a medida que aumenta la concentración del material disuelto por la acción de la evaporación. Este fenómeno se llama elevación del punto de ebullición. Para mantener a un nivel bajo la temperatura de los materiales termosensibles suele ser necesario operar a presiones inferiores a 1 atm, es decir, al vacío.
6. **Formación de incrustaciones y materiales de construcción.** Algunas soluciones depositan materiales sólidos llamados incrustaciones sobre las superficies de calentamiento. Estas incrustaciones se forman a causa de los productos de descomposición o por disminución de la solubilidad. El resultado es una reducción del coeficiente de transferencia de calor, lo que obliga a limpiar el evaporador.

1.2.3 Transferencia de masa y calor en la evaporación.

Un evaporador es básicamente un intercambiador de calor equipado con instrumentos apropiados para la separación del vapor del líquido en ebullición. La capacidad de evaporación de un sistema está determinada por la cantidad de energía transferida desde el medio de calentamiento al líquido en ebullición (Singh, P. & Heldman, D., 2014).

En un evaporador, el calor se transfiere del vapor a través de una pared que lo separa del líquido en ebullición (Figura 3), donde la cantidad de energía transferida por unidad de área o “flujo de calor” está dada por la ecuación 1:

$$\frac{q}{A} = U (T_S - T_C) \dots \dots \dots (1)$$

Donde: U es el coeficiente global de transferencia de calor (W*m⁻² *K⁻¹) Ts es la temperatura del vapor (°K) y Tc la temperatura del concentrado (°K). El flujo de calor puede ser mayor si se incrementa el coeficiente U, la diferencia de temperaturas Ts- Tc o ambas.

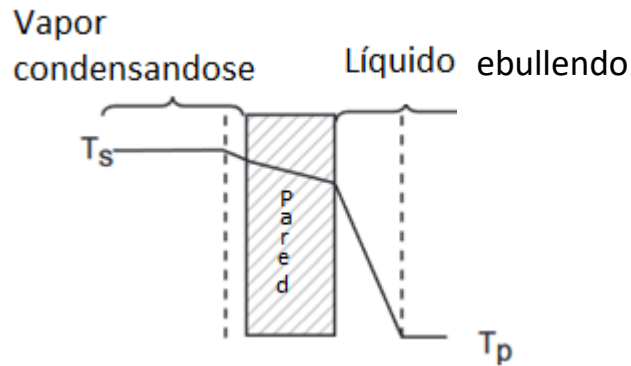


Figura 3. Transferencia de calor en un evaporador (Ibraz, 2005)

El coeficiente global de transferencia de calor U.

La resistencia global a la transferencia de calor en el proceso de evaporación se representa como la suma de tres resistencias en serie, estando específicamente en función de la película de condensación del vapor, de la pared sólida y de la del líquido en ebullición, la cual se representa en la ecuación 2:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_c} + \frac{\varepsilon}{k} + \frac{1}{\alpha_b} \dots\dots\dots(2)$$

donde:

α_c y α_b = Coeficientes de transferencia de calor de la película de condensación del vapor y del líquido en ebullición. (**NOTA:** El coeficiente convectivo de transferencia de calor se representa con la letra α , para evitar confusiones con la entalpia específica, **h**). ε = espesor de la pared (m) y k = conductividad térmica de la pared ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

La transferencia de calor del lado del vapor.

La resistencia de la película de vapor condensada es normalmente baja y su contribución para la suma de la resistencia total es despreciable.

La transferencia de calor a través de la pared.

La pared suele estar hecha por materiales de alta conductividad térmica y de espesor delgado por lo que su resistencia térmica suele ser baja, aunque su valor puede incrementar considerablemente y volverse un problema serio debido a las incrustaciones, que son depósitos de ciertos sólidos en el área de transferencia, del lado del producto. Estos sólidos pueden ser proteínas coaguladas de leche, azúcar caramelizada de jugos de frutas o café soluble, pulpa quemada en la pasta de tomate, o solutos que alcanzan su límite de solubilidad mientras que el material se concentra, como las sales de calcio en la leche o la hesperidina en el jugo de naranja (Berk, 2013).

La transferencia de calor del lado del producto.

Esta es la parte más crítica del coeficiente global de transferencia de calor, además suele ser el dato con más dificultad para calcular o predecir con confianza, su complejidad se debe a la presencia y acción de una fase de vapor mezclada con el líquido, la irregularidad del área de transferencia de calor, y el tremendo cambio en las propiedades del líquido en función a la pérdida de agua. Cualitativamente, el coeficiente de transferencia de calor del lado del producto se incrementa con la intensidad del movimiento del líquido en relación con la pared. (Berk, 2013).

La viscosidad:

- Aumenta considerablemente con la concentración
- Es afectada fuertemente por la temperatura
- Muchos alimentos líquidos son no newtonianos y adelgazantes a la cizalla. Su viscosidad se afecta por el flujo y la agitación. El efecto positivo de la agitación en la transferencia de calor es más acentuado en los casos de los fluidos adelgazantes a la cizalla.

La diferencia de temperatura.

La diferencia de temperatura ($T_s - T_o$) es por supuesto, la fuerza que origina la transferencia de calor. Esta se puede incrementar ya sea elevando la temperatura del vapor o disminuyendo la temperatura de evaporación, estas acciones se aplican en la práctica, pero cada una tiene sus limitaciones (Berk, 2013):

- Incremento de la temperatura del vapor: Temperaturas de vapor altas significa tener temperaturas en la superficie más altas y el incremento del riesgo del daño térmico para el producto en contacto directo con la pared, particularmente si la transferencia de calor al lado del producto no es suficientemente rápida.
- Disminuir la temperatura de ebullición: La temperatura de ebullición de una solución es una función de la concentración y la presión. La temperatura de ebullición de una solución acuosa es mayor que la del agua pura a la misma presión. La diferencia es conocida como elevación del punto de ebullición. La elevación del punto de ebullición de una solución es consecuencia de la caída de presión de vapor del agua por la presencia de solutos.

1.3 Pasteurización.

La pasteurización es un método de conservación de alimentos que ayuda a la extensión de su vida útil mediante la inactivación de microorganismos, enzimas y células patógenas (Chandrasekaran et al., 2013). La finalidad del proceso de pasteurización es la reducción de números de organismos patógenos y responsables del deterioro en una cantidad específica, normalmente entre 5 a 6 reducciones logarítmicas. Los tratamientos de pasteurización para alimentos involucran el hecho de tener un proceso térmico que es menos severo (72 °C por 15 segundos) que el proceso completo de esterilización que normalmente viene dada a 3 minutos a una temperatura de 121.1°C, el hecho de usar la pasteurización o la esterilización depende del alimento y las características sensoriales a conservar (Aghajanzadeh & Mohammad, 2018).

Los alimentos pasteurizados representan uno de los grupos más grandes de alimentos preservados entre los cuales se incluyen alimentos como los jugos de frutas y batidos, productos enlatados, alimentos cocidos y enfriados, productos horneados, cerveza y bebidas suaves, entre otros (Chandrasekaran, et al., 2013).

Si bien el tratamiento térmico es el método más antiguo de pasteurización, esta definición incluye procesos no térmicos tales como la alta presión e impulsos eléctricos por lo que la pasteurización se redefinió por el Departamento de Agricultura de los E.U.A como “Cualquier proceso, tratamiento o combinación de los mismos, que se aplica a los alimentos para reducir el número de microorganismos más resistentes a un nivel que no es probable que presente un riesgo para la salud pública en condiciones normales de distribución y almacenamiento” (National Advisory Committee on Microbiological Criteria for Food, 2006). Recientemente se han investigado los efectos de este tipo de procesamientos alternos sobre el contenido de microorganismos y propiedades en los alimentos donde se han obtenido resultados como una mayor inactivación de enzimas a través de sistemas de microondas que por calentamiento convencional, o la introducción del tratamiento térmico óhmico como un método de procesamiento efectivo en la elaboración de jugos (Simpson, 2009).

1.3.1 Tipos de pasteurización.

Existen en general tres tipos de pasteurización, que se dividen en pasteurización térmica, pasteurización no térmica, y la combinación de métodos para lograr el proceso.

1. La pasteurización térmica. Se refiere al calentamiento del jugo hasta una temperatura deseada, la cual se mantendrá por un lapso específico, todo eso con base en la resistencia térmica del microorganismo o enzima objetivo. En un baño de agua discontinuo, el equipo de pasteurización más simple, el jugo envasado se mantiene a una temperatura suficientemente alta durante el tiempo necesario. Mientras está en un pasteurizador de baño de agua continuo, el producto está sujeto

a aerosoles de agua caliente continuos mientras se mueve a través de un túnel (Chandrasekaran, et al. 2013). Los intercambiadores de calor, que se emplean ampliamente en el procesamiento del jugo, se clasifican según el proceso de transferencia (directo e indirecto), construcción (tubular, tipo de placa, superficie extendida y regenerativa) y disposición de flujo (paso único y múltiple). Según el tipo de producto, la disponibilidad del equipo, el costo y el consumo de energía, se pueden usar dispositivos de tratamiento convencional por lotes o continuos.

2. La pasteurización no térmica. Son aquellos procesos donde no se usan calor, que aseguren la destrucción de patógenos y mantengan los alimentos seguros para comer. Estos tratamientos proveen una mejor opción debido a que reducen el sobre procesamiento que da como resultado un producto más parecido al fresco o sin procesar. Actualmente, existen varios métodos definidos como no térmicos que se usan para la pasteurización de líquidos como los pulsos eléctricos, procesos de alta presión hidrostática, irradiación y luz ultravioleta, entre otros (Chen, et al., 2010).

3. La combinación de tratamientos térmicos y no térmicos. Considerando las demandas de los consumidores, la combinación de procesamientos no térmicos con procesamientos térmicos moderados han mostrado efectos de sinergia, por ejemplo, Rivas et al. (2006) realizó un estudio donde se utilizaba un campo de pulsos eléctricos combinados con un tratamiento térmico convencional, observando un incremento del 5% en la inactivación de la enzima pectinmetilesterasa (PME) en jugo de naranja y zanahoria, que es la causante de pérdidas de calidad en los jugos debido a que causa la de-esterificación de la pectina, que se encuentra naturalmente en los cítricos, influenciando el color, la viscosidad, sabor, el “mouth feeling” (sensación en la boca) y la estabilidad de la nube (un líquido transparente, sin presencia de materia opaca o materia turbia), esta enzima es usada como el parámetro a inactivar en la pasteurización debido a que su resistencia térmica es mayor a la de los microorganismos que causan la descomposición (Aghajanzadeh & Mohammad, 2018).

1.3.1.1 Pasteurización por microondas.

El calentamiento por microondas se utiliza en muchos procesos tales como el recalentamiento, precocción, atemperado, horneado, secado, pasteurización y esterilización en la industria. Las microondas, son ondas electromagnéticas que cubren un espectro de frecuencias en el intervalo de 300MHz a 30GHz, aunque las frecuencias permitidas para el uso casero/industrial es de 915 MHz y 2450 MHz respectivamente. Estas, al igual que ondas de luz, son reflejadas por objetos metálicos, absorbidas por materiales dieléctricos y transmitidos a través del vidrio.

Los materiales que absorben la radiación de microondas se llaman dieléctricos, por lo tanto, el calentamiento por microondas también se conoce como calentamiento dieléctrico. Al principio tienen muy pocos portadores de carga libres. Cuando se aplica un campo eléctrico externo hay muy poca carga transportada a través de la matriz de material. En segundo lugar, las moléculas o átomos que comprenden el dieléctrico presentan un movimiento dipolar. Un dipolo se entiende como dos cargas iguales y opuestas separadas por una distancia finita (Jaehwan & Ki-Baek, 2012).

Las propiedades dieléctricas se pueden clasificar en dos: la constante dieléctrica y el factor dieléctrico de pérdidas. La constante dieléctrica (ϵ') es la capacidad de un material de almacenar energía de las microondas y el factor dieléctrico de pérdidas (ϵ'') es la capacidad de un material de disipar la energía de las microondas en forma de calor. Los valores de las constantes dieléctricas y del factor de pérdida juegan importantes papeles en la determinación de la interacción de las microondas con el alimento (Sahin & Gülüm, 2006). La velocidad de generación de calor por unidad de volumen (Q) en un punto en el interior del alimento durante el calentamiento con microondas se puede caracterizar mediante la ecuación 3:

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \dots\dots\dots(3)$$

Donde f es la frecuencia (Hz), ϵ_0 es la constante dieléctrica en el vacío (8.854×10^{-12} F/m), ϵ'' es el factor dieléctrico de pérdida y E es el campo eléctrico (V/m).

Las propiedades dieléctricas de los productos alimentarios dependen de la composición. Los contenidos en hidratos de carbono, grasas, humedad, proteínas y sal son los principales componentes de los alimentos.

Los componentes de los alimentos tales como las proteínas, los triglicéridos y los almidones tienen actividades dieléctricas bajas a las frecuencias de microondas. Por otra parte, el agua libre, los monosacáridos y los iones tienen una actividad dieléctrica elevada. Los almidones, los azúcares y las gomas son los principales hidratos de carbono de los sistemas alimentarios. Para las soluciones de hidrato de carbono, el efecto del agua libre sobre las propiedades dieléctricas se vuelve importante puesto que los hidratos de carbono por sí mismos tienen actividades dieléctricas bajas a las frecuencias de las microondas. Los enlaces de hidrógeno y las interacciones hidroxilo-agua también juegan un papel importante en las propiedades dieléctricas de azúcares no simples, malto dextrina, hidrolizado de almidón y lactosa tales como los alimentos basados en disacáridos (Sahin & Gülüm, 2006).

La sacarosa es un ingrediente alimentario importante que absorbe más microondas si se compara con otros hidrocoloides. Los azúcares modifican el comportamiento dieléctrico del agua. Las interacciones hidroxilo-agua estabilizan el agua líquida por los puentes de hidrógeno y afectan las propiedades dieléctricas de las soluciones de azúcares. El grado de interacción de las microondas dependen de la extensión de los puentes de hidrógeno. Los grupos hidroxilo de la glucosa son más accesibles para la fijación de hidrógeno si se comparan con los almidones.

En los almidones, menos grupos hidroxilos están expuestos al agua y se forman menos enlaces estables de hidrógeno (Sahin & Gülüm, 2006), encontrando que las propiedades dieléctricas de las soluciones de glucosa con diferentes concentraciones (10-60%) son función de la temperatura y de la composición. La constante dieléctrica de la solución de glucosa aumenta, pero el factor de pérdidas disminuye con la temperatura.

Aumentando la concentración de glucosa, la constante dieléctrica disminuyó puesto que había menos agua libre para responder al campo eléctrico. La determinación de las propiedades dieléctricas llega a ser significativa para la comprensión de los perfiles de calentamiento de los alimentos en un horno, y para el desarrollo del equipo y de los alimentos que pueden ser tratados por microondas.

El calentamiento por microondas se prefiere para los procesos de pasteurización y esterilización sobre el calentamiento convencional debido a que el proceso es más rápido y requiere un menor tiempo para llegar a la temperatura deseada.

Para el proceso de alimentos líquidos, los procesos HTST (alta temperatura – corto tiempo) han sido aceptados por la industria procesadora de alimentos para reducir las degradaciones térmicas adversas en la calidad del alimento mientras que se asegura que el alimento sea seguro. Sin embargo, los procesos HTST no son recomendables para alimentos sólidos procesados por los métodos convencionales debido a la conducción lenta del calor, que en muchas ocasiones causa un sobrecalentamiento en la superficie del sólido durante el tiempo necesario para que el calor sea transferido al punto más frío del alimento. Este proceso tiene la ventaja de sobrepasar la limitación impuesta por la difusión térmica lenta del proceso de calentamiento convencional (Ibraz, 2005).

El calentamiento volumétrico generado por las microondas puede reducir significativamente el tiempo total de calentamiento requerido y la severidad de las temperaturas elevadas necesarias para la esterilidad comercial por lo cual la destrucción bacteriana se alcanza y la degradación térmica de los componentes deseados se reduce.

1.3.1.1.1 Mecanismo de acción.

La destrucción de microorganismos o enzimas por microondas o radiofrecuencia se ha explicado mediante una o más de las siguientes teorías: calentamiento selectivo, electroporación, ruptura de membrana celular y acoplamiento de campo magnético, (Chandrasekaran et al., 2013). La teoría del calentamiento selectivo sugiere que los

microorganismos se calientan selectivamente debido a las microondas y alcanzan una temperatura más alta que la del fluido circundante. Esto hace que los microorganismos sean destruidos más rápidamente. Con respecto a la teoría de la electroporación, el potencial eléctrico a través de la membrana celular genera poros, lo que da lugar a la fuga de materiales celulares. En la teoría de ruptura de la membrana celular, ésta se rompe debido al voltaje aplicado, eliminando así posibles riesgos. De acuerdo con la teoría del acoplamiento de campo magnético, los componentes internos de la célula se interrumpen debido al acoplamiento de energía electromagnética con moléculas críticas tales como proteína o ADN.

La inactivación de microorganismos y enzimas de jugos de frutas, por ejemplo, jugos de cítricos por pasteurización de microondas - especialmente en sistemas de flujo continuo - ha creado interés entre los fabricantes de procesadores de jugo debido a una menor exposición térmica, eliminación de incrustaciones en la tubería y retención de la calidad del jugo. Tajchakavit & Ramaswamy (1997), reportaron que los tiempos de reducción decimal para las PME para el calentamiento por microondas fueron de 38, 12, 4.0 y 1.3 segundos a 55, 60, 65 y 70 °C respectivamente, durante el calentamiento convencional. Las microondas se han aplicado a distintos procesos como en la evaporación al vacío, por ejemplo, Nikdel et al. (1993) reportaron el uso de un sistema de pasteurización de flujo continuo a base de microondas usando como objetivo las PME, cerca del 98.5% y 99.5% de las PME fueron inactivadas por el calentamiento vía microondas a temperaturas mayores de 75°C con 10 a 15 segundos de tiempo de residencia.

Capítulo II.- Metodología Experimental.

2.1 Objetivo

Evaluar el proceso de evaporación al vacío en jugos cítricos pasteurizados por microondas mediante la eficiencia evaporativa y energética para establecer las mejores condiciones de proceso.

2.2 Objetivos particulares

Objetivo particular 1.-

Establecer el tiempo y temperatura de pasteurización por microondas en jugo de naranja y mandarina a través de perfiles de temperatura para inactivar la PME.

Objetivo particular 2.

Evaluar el efecto de las condiciones y el orden de proceso sobre los cambios de color, acidez, pH y vitamina C mediante pruebas físicas y fisicoquímicas para determinar en cuales se mantiene la mejor calidad del producto.

Objetivo particular 3.

Determinar la eficiencia energética del proceso de evaporación al vacío y pasteurización al vacío de jugos cítricos a través de balances de materia y energía.

2.3 Variables del proceso.

Se manejaron dos frutas cítricas: naranja y mandarina. Las condiciones de evaporación se establecieron a temperaturas de 50 y 40°C aplicando un vacío de 580 mmHg, manejando dos tamaños de partícula (0.5 y 1.5 mm ϕ) que se denominaron partícula fina y partícula gruesa en un rotavapor RE100-PRO DLAB. El jugo fue sometido a dos diferentes órdenes de proceso, siendo el concentrar-pasteurizar el primero y el pasteurizar-concentrar el segundo, donde la pasteurización se llevó a cabo a una potencia de 1000W.

2.4 Materiales y métodos.

2.4.1 Preparación de la muestra.

Se compraron naranjas y mandarinas de la central de abastos de Tultitlán, las cuales fueron lavadas y peladas. Se les retiraron las semillas, para después obtener el jugo a través de un extractor de jugos HUROM Serie HN, obteniendo dos tamaños de partícula (0.5 Y 1.5 mm ϕ), el jugo fue usado de manera inmediata para su procesamiento.

2.4.2 Medición de color.

Se realizó mediante análisis de imágenes donde las muestras de jugo fueron iluminadas por 2 lámparas fluorescentes dentro de una cámara oscura, la cual fue adaptada para la toma de imágenes a través de una cámara Canon® EOS Rebel T6 con un modo de captura específico para alimentos, las cuales se capturaron en la máxima resolución y almacenadas en una computadora. La cuantificación del color se realizó en el espacio CIELAB 1976 y se utilizó el software Adobe Photoshop CS6® (Adobe Systems inc.). A partir de la imagen capturada en formato TIFF no comprimido se obtuvo el valor de la media y desviación estándar para cada uno de los valores L, a y b. Los valores L, a y b obtenidos se convirtieron a valores L*, a* y b* a través de las siguientes ecuaciones propuestas por Yam & Papadakis (2004):

$$L^* = (100/255) * L \dots\dots\dots(4)$$

$$a^* = (240/255) * a - 120 \dots\dots\dots (5)$$

$$b^* = (240/255) * b - 120 \dots\dots\dots(6)$$

Los tres parámetros de color medidos fueron reportados como el índice de pardeamiento (BI). El BI representa el color café puro y es considerado como un parámetro importante asociado al pardeamiento no enzimático por lo que sirve como respuesta del efecto del tratamiento térmico (Diamante et al, 2010).

$$BI = [100(x - 0.31)] / 0.17 \dots\dots\dots(7)$$

$$x = \frac{(a^* + 1.75L^*)}{(5.645L^* + a^* - 3.012b^*)} \dots\dots\dots (8)$$

Se evaluó también el cambio total de calor (ΔE) para observar el efecto del orden de las operaciones y el conjunto de las variables en total usando la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \dots\dots\dots (9)$$

2.4.3 Medición de pH.

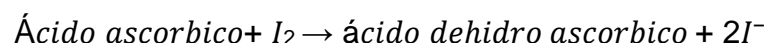
Se midió la variación del pH a las diferentes condiciones de operación establecidas para observar el efecto sobre el jugo, usando un potenciómetro HANNA Instruments HI 207.

2.4.4 Medición de acidez.

Se midió la acidez de los jugos antes, entre y después del proceso para observar los cambios debido a las diferentes condiciones, se realizaron 3 mediciones siguiendo los pasos establecidos por la NMX-F-102-NORMEX-2010 utilizando el método de valoración por equivalentes midiendo el pH, para después calcular la acidez. Se utilizó un potenciómetro HANNA Instruments HI 207 y una solución de NaOH al 0.1 N.

2.4.5 Determinación de ácido ascórbico.

Este método determina la concentración de vitamina C en una solución mediante una titulación redox usando yodo. A medida que se añade el yodo durante la titulación, el ácido ascórbico se oxida a ácido dehidroascórbico, mientras que el yodo se reduce a iones yoduro.



Debido a esta reacción, el yodo formado se reduce inmediatamente a yoduro mientras exista cualquier ácido ascórbico presente. Una vez que todo el ácido ascórbico se ha oxidado, el exceso de yodo es libre de reaccionar con el indicador de almidón, formando el complejo de almidón y yodo azul-negro. Este es el punto final de la valoración (Canterbury, 2016).

2.4.6 Perfil de temperatura.

Para la estimación de las temperaturas de pasteurización por microondas, se realizaron pruebas con agua y jugo de naranja a distintos tiempos para observar la evolución de la temperatura usando un horno de microondas Samsung modelo CMO, un termómetro especial para microondas que se ubicó en el centro del recipiente que contenía el jugo.

2.4.7 Actividad enzimática.

La actividad enzimática de la PME fue calculada por el método de Kimball, para la medición de la actividad de PME, 10 ml de jugo de naranja o mandarina fue mezclado con 40 ml de sustrato de pectina-sal al 1% (0.1M NaCl) y fue incubada a 30°C. La solución se ajustó a un pH 7.0 con una solución 2.0 N de NaOH, y después el pH de la solución fue reajustada a un pH dentro de los valores de 7.6 a 7.8 con una solución de NaOH al 0.05N. Después se agregaron 0.10 ml de NaOH al 0.05N. Se midió el tiempo (t) hasta que el pH de la solución volviera a obtener el valor de pH dentro del intervalo establecido. La actividad de la PME (%) se calculó por las siguientes formulas, donde t es el tiempo en minutos; A_0 es la actividad de la PME de la muestra sin tratar, que fue determinada inmediatamente después del proceso de elaboración para evadir efectos por el tiempo de almacenamiento, y A_t es la actividad de las PME después del tratamiento (Agcam et al, 2016)

La actividad de PME (A) se calculó mediante las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{(0.05N_{NaOH}) * (0.10ml_{NaOH})}{(\text{tiempo}(\text{min})) (10\text{ml muestra})} \dots \dots \dots (11)$$

$$\text{Actividad residual de PME (\%)} = \left(\frac{A_t}{A_0} \right) \dots \dots (12)$$

Donde A_t es la actividad enzimática después del proceso y A_0 es la actividad enzimática inicial.

2.4.8 Balances de materia y energía.

Para determinar las pérdidas de energía durante el proceso de evaporación se realizaron balances de materia y energía en el rotavapor, delimitando el sistema a donde sólo se realiza el proceso de concentración (Figura 4), además se estableció que el movimiento del matraz no influye durante el proceso y que el proceso no genera calor; en el caso de la pasteurización por microondas se supuso que el sistema está totalmente aislado y no genera pérdida, por lo que la energía consumida será equivalente a la potencia a la cual se use el equipo.

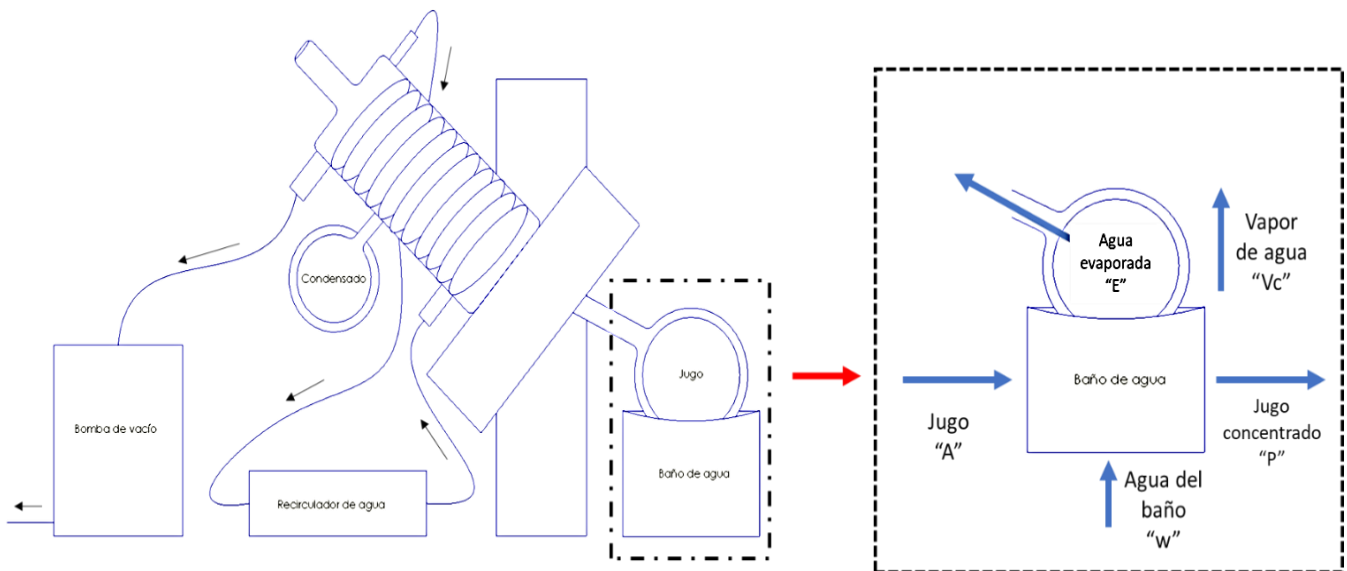


Figura 4. Condiciones para el balance.

Se parte de la ecuación:

$$Q_{Entrada} = Q_{salida} + Q_{Perdido} \dots\dots\dots(13)$$

La cual al revisar la fig. 4 se puede desglosar en:

$$Q_A + Q_w = Q_E + Q_{VC} + Q_{Perdido} + Q_P \dots\dots\dots(14)$$

Como Q es igual a:

$$Q = H - W \dots\dots\dots(15)$$

Como se tiene un trabajo térmico W que está dada por $\rho dv + VdP$, se sustituye en la ecuación anterior, obteniendo:

$$Q = H - (\rho dv + VdP) \dots\dots\dots(16)$$

Y debido a que el proceso es a presión y temperatura constantes, la ecuación se transforma en:

$$\bar{Q} = H * m \text{ (Proceso por lotes) } \dots\dots\dots(17)$$

$$\bar{Q} = H * F \text{ (Proceso continuo) } \dots\dots\dots(18)$$

Donde m(g) es la masa del jugo utilizada en el proceso y F(m³/h) es el flujo del proceso, respectivamente.

Por lo que la ecuación 16 queda de la siguiente manera debido a que durante la experimentación se manejó el sistema por lotes:

$$H_A * m_A + H_W * m_W = H_E * m_E + H_{vc} * m_{vc} + H_{Perdido} * m_{Perdido} + H_p * m_p \dots\dots\dots(19)$$

Y como $H_{perdido} * m_{perdido} = Q_{perdido}$, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$Q_{perdido} = H_w * m_w + H_{vc} * m_{vc} - H_E * m_E - H_P * m_P + H_A * m_A \dots\dots\dots(20)$$

Capítulo III. Análisis de resultados.

3.1 Objetivo particular 1.

En la Figura 5 se observa la evolución de la temperatura respecto al tiempo de jugo de naranja y de agua en el horno de microondas, donde la tendencia se ajustó a distintos modelos matemáticos los cuales sirvieron para estimar el tiempo de calentamiento necesario para llegar a la temperatura de pasteurización de $82 \pm 2^\circ\text{C}$ para la inactivación de la PME en calentamiento por microondas (Aghajanzadeh & Mohammad, 2018). A partir de los datos de la temperatura obtenidos en el centro geométrico definido por un cilindro, se construyeron gráficas, las cuales fueron sometidas a distintos tipos de regresión para obtener la ecuación matemática para establecer los tiempos de procesamiento, que se establecieron en un intervalo de 1:30 a 2:30 minutos.

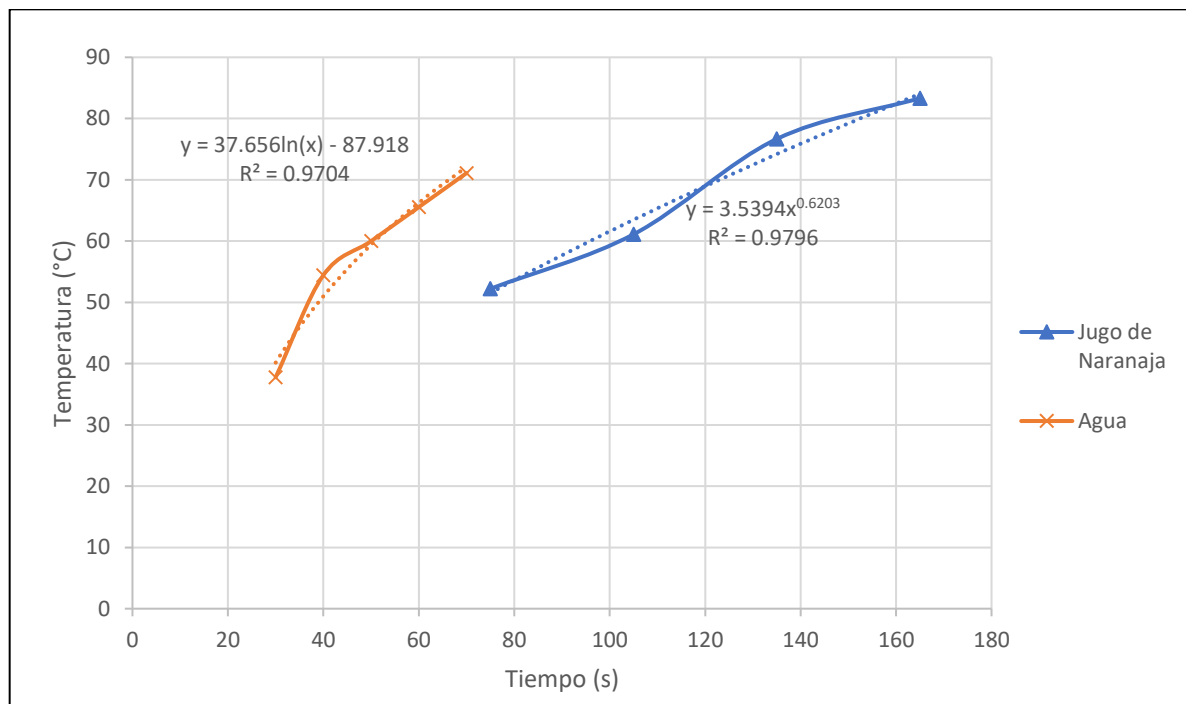


Figura 5. Perfil de Temperatura

En comparación con métodos de calentamiento más tradicionales, el tiempo en que tarda el producto en llegar a la temperatura de pasteurización (Come Up Time o CUT) por microondas suele ser menor, lo que resulta en menores pérdidas nutricionales, además de que la PME teniendo una estructura proteica con muchos sitios polares y cargados es afectada por el campo eléctrico de las microondas Tajchakavit & Ramaswamy (1997). En la Figura 6 se pueden observar los tiempos de calentamiento de los diferentes jugos con diferente tamaño de partícula y orden de operaciones, donde se tiene que el jugo más rápido en calentarse fue el de naranja, con el tamaño de partícula fino y en el orden de concentrar-pasteurizar, debido a que aquellos jugos procesados con un tamaño de partícula menor tuvieron un efecto del procesamiento térmico mayor, ya que las ondas electromagnéticas del horno de microondas tienen una mayor movilidad para atravesar el producto y por lo tanto tener una distribución más homogénea del calor (Cinquanta, L et al, 2010).

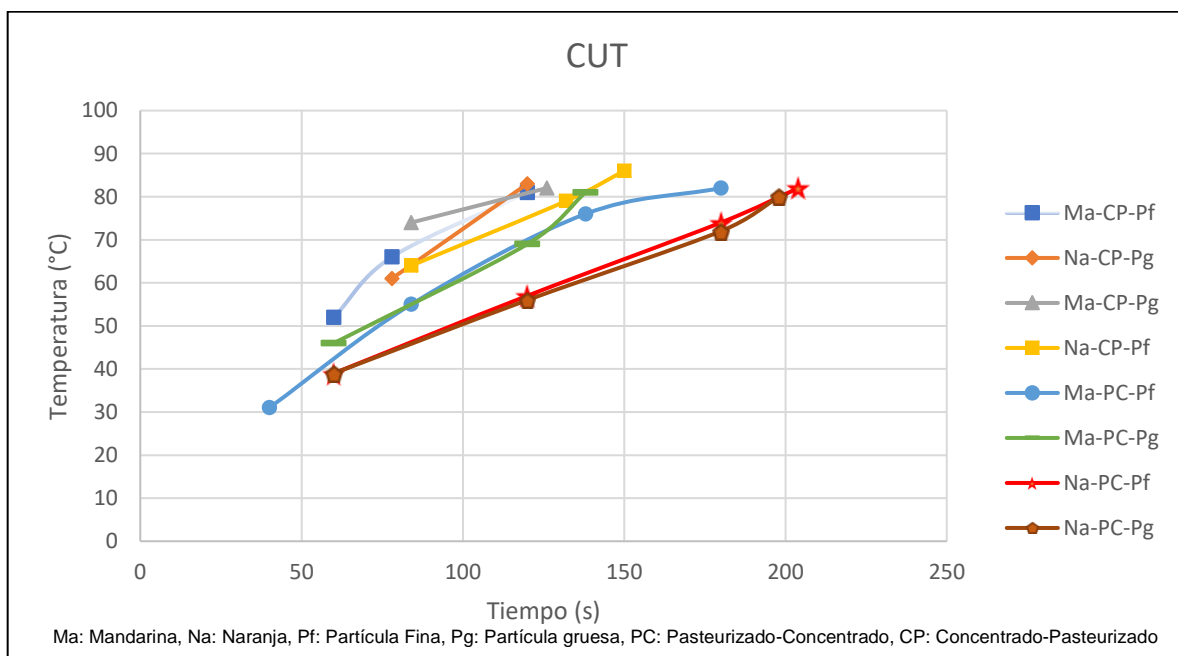


Figura 6. Tiempo de calentamiento "CUT" en el horno de microondas.

La diferencia de tiempo entre los jugos que primero fueron concentrados a los que primero fueron pasteurizados se debe a la diferencia de volúmenes que hay entre los procesos. Se ha visto que, durante el calentamiento en microondas por lotes, el mayor factor que limita la inactivación de la PME es la formación de “puntos calientes” que se relaciona con un calentamiento no uniforme; el cual causa que los cálculos de letalidad sean inapropiados y disminuya la eficiencia del proceso. Sin embargo, este no es el caso para jugos pasteurizados por microondas, debido a la naturaleza líquida y al calentamiento uniforme de esta clase de productos (sistemas concentrados de transferencia de calor) (Cinquanta et al, 2010), además de que estudios como los que reportan Chandrasekaran et al. (2013) muestran el desarrollo de la temperatura sin movimiento y con ayuda del movimiento del carrusel (normalmente un plato de vidrio templado que gira dentro del microondas).

Con respecto a la inactivación de la enzima, se muestra la actividad residual de la PME en la Figura 7. Se observa que aquellos jugos procesados con un tamaño de partícula menor tuvieron un efecto del procesamiento térmico mayor, debido a que las ondas electromagnéticas del horno de microondas tienen una mayor movilidad para atravesar el producto y por lo tanto tener una distribución más homogénea del calor, además de ser aquellos con los cuales los tiempos de pasteurización fueron menores comparados con los de mayor tamaño de partícula. La inactivación de la PME un 80% más baja y obteniendo una inactivación del 95.75%, resultados similares a los que reporta Nikdel et al (1993) siendo estos del 98.5% y 99.5% usando un sistema de flujo continuo de pasteurización por microondas de jugo de naranja a temperaturas mayores de 75°C. El jugo con menor actividad residual fue aquel en el cual primero se pasteurizó y después se realizó la concentración al vacío.

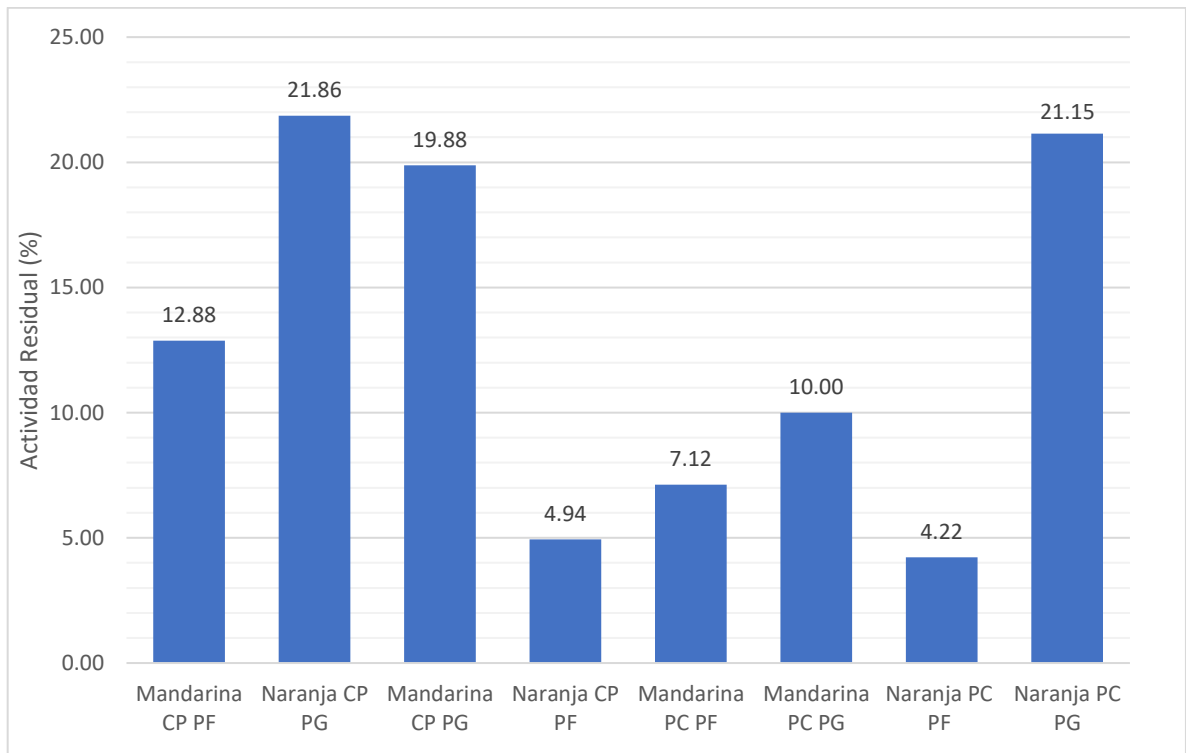


Figura 7. Actividad residual de PME.

Se compararon dos de los valores obtenidos de la inactivación de PME del proceso junto a otros procesamientos térmicos diferentes, no térmicos y en conjunto en el Cuadro 5, donde se observa que los resultados obtenidos están cercanos a valores como de procesos térmicos convencionales como los son la pasteurización usando intercambiadores de placas habiendo poca diferencia entre los valores porcentuales, además de ser valores pequeños comparados con los otros procesos. El tiempo de procesamiento para la pasteurización de jugos varía dependiendo del proceso, siendo la pasteurización por microondas uno de los más rápidos en comparación a los sistemas sujetos a presión, por ejemplo, que desde el punto de vista industrial es mejor y consecuentemente involucra un menor costo de operación.

Cuadro 5. Comparación de la actividad residual de PME entre distintos procesos.

Método de Procesamiento	Cítrico	Actividad Residual (%)
Intercambiador de Placas (74°C, 10s) ¹	Mandarina Clemenules	6.5
Intercambiador de Placas (84°C, 10s) ¹		3.9
Intercambiador de Placas (84°C, 10s) ¹	Mandarina Ortaquine	10
Baño hidrotérmico con aplicación de presiones altas (700 MPa, 55°C, 2min) ²	Bebida de naranja con leche (70-30)	0.1
Aplicación de presión (50°C, 400 MPa, 12min) ³	Naranja Florida	50.1
Campo de pulsos eléctricos (25.3Kv/cm, 1033.9µs) ⁴	Naranja Kozan	10.6
Microondas (82°C, 10s)	Naranja Valencia	4.22
Microondas (82°C, 10s)	Mandarina Navel	7.12

1.-Carbonell et al (2006) 2.- Sampedro et al (2008) 3.- Nienaber et al (2011) 4.- Agcam et al (2014)

3.2 Objetivo particular 2.

3.2.1 Cambio de color.

En la Figura 8 se muestra una gráfica comparativa del color de jugo de naranja y mandarina antes del proceso, y su cambio después de concentrar al vacío y pasteurizar por microondas. Se observa que existe una disminución del índice de pardeamiento en la mayoría de los jugos en la etapa de concentración, debido principalmente al tiempo que el jugo estuvo sometido al tratamiento, haciendo que pierda intensidad, además se observa que al realizar el proceso en sentido inverso se puede evitar el cambio total del color, puesto que los tiempos de calentamiento y enfriamiento son mucho más rápidos, inactivando así a las enzimas que pudieran

realizar algún cambio de color, resultados similares obtuvieron Gama y De Sylos (2007) en la pasteurización del jugo de naranja, observando disminución de pigmentos tales como la violaxantina (38%) y la luteína (20%) en procesos de concentración y evaporación. Aunque también pueden ocurrir cambios en los aspectos físicos del jugo, tales como el cambio de color por degradación térmica del ácido ascórbico (siendo esta una vitamina sensible al calor) y no debido a un pardeamiento enzimático.

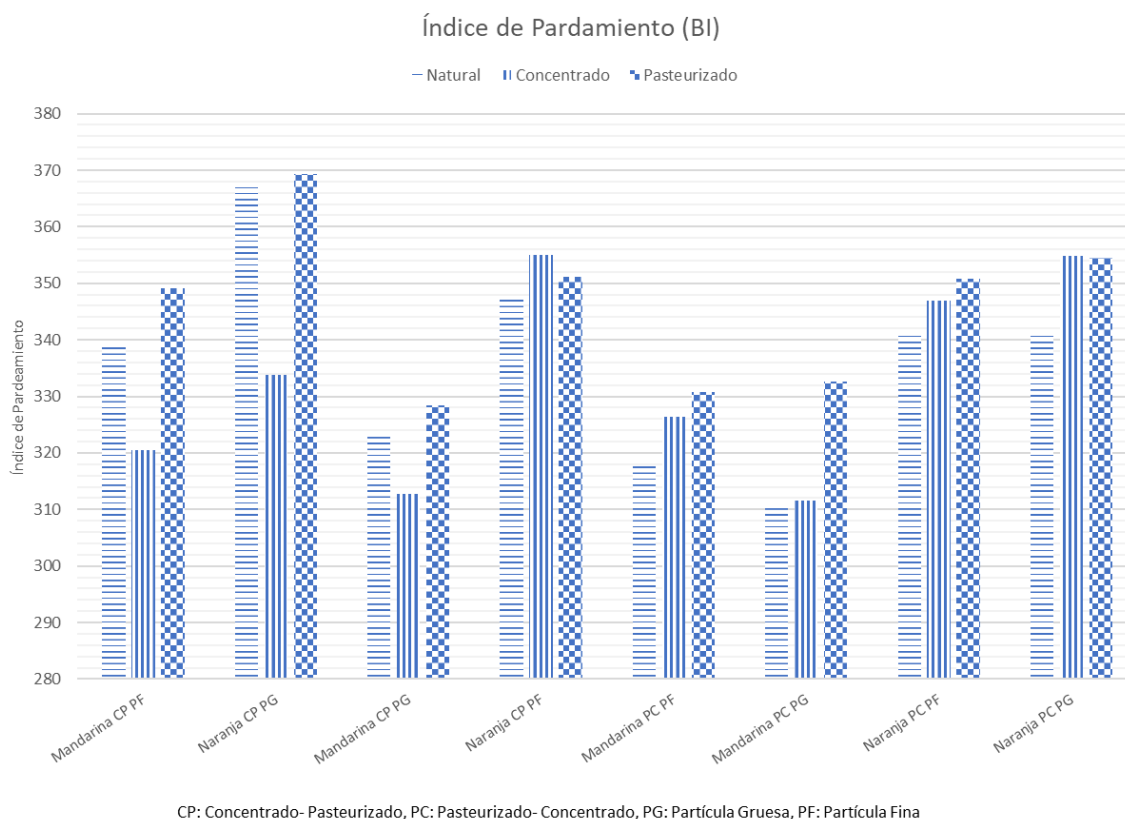
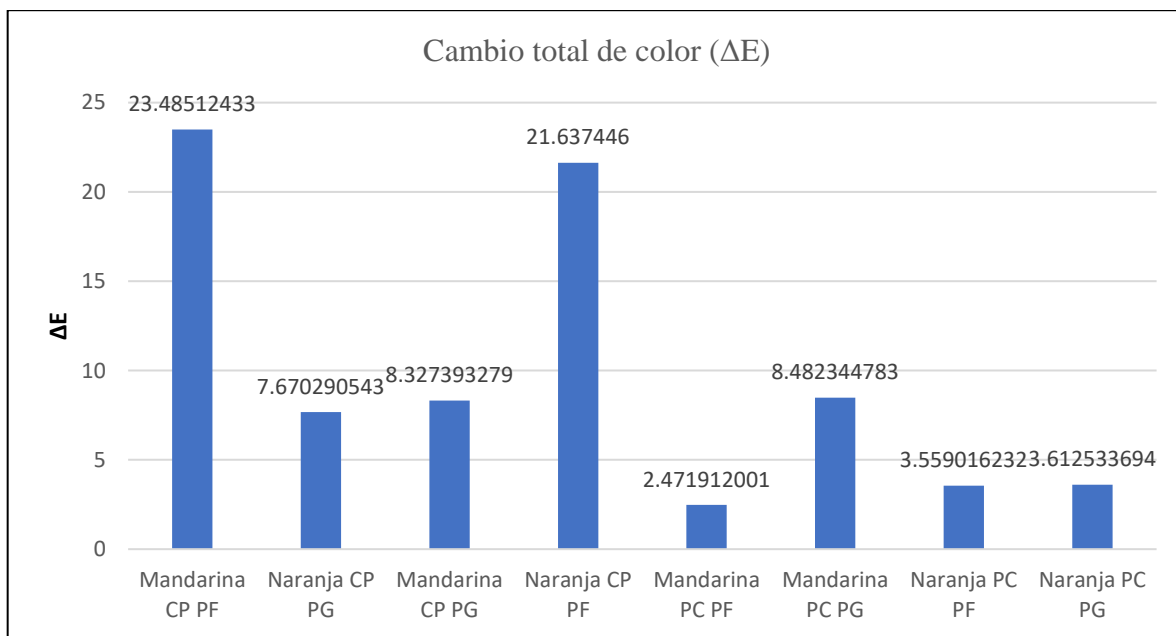


Figura 8. Índice de pardeamiento.

Respecto al cambio total de color ΔE , en la figura 9 se observa que hay dos procesos en los cuales se nota una diferencia, esto puede ser explicado debido a un tratamiento excesivo en la pasteurización debido a que el calor generado en el proceso incrementa rápidamente, además de ser una característica influenciada por el grado de madurez de la fruta, exposición al aire, forma de cosechar y forma de

extracción (Wei et al, 2018). Con respecto a los demás resultados, existe una diferencia en función al tamaño de partícula, siendo menos afectadas aquellas con un tamaño de partícula menor, de tal manera que el efecto térmico es menor ya que pasa menos tiempo procesándose, ligado a esto, los jugos que se pasteurizaron primero fueron los menos afectados en general debido a que se tiene un calentamiento rápido seguido de un enfriamiento lo que minimiza el efecto térmico, atribuyéndole el mayor cambio al tiempo de residencia dentro del rotavapor. El valor más bajo del ΔE fue de 2.47, que si se compara con otros procesos está dentro del intervalo; por ejemplo, de procesos térmicos convencionales como el reportado por Lee & Coates (2003) de 2.92 usando un baño térmico (90°C, 30s), lo reportado por Cortés et al (2008) reportaron 2.4 usando un evaporador rotatorio con vacío (55°C, 80kPa). Assaearachan & Noomhorn (2008) reportan valores de 5.39 usando pulsos eléctricos (30 kV/cm, 100 μ s). Se tiene entonces que un calentamiento térmico no convencional como el calentamiento por microondas puede estar a la par o ser mejor que procesos no térmicos.

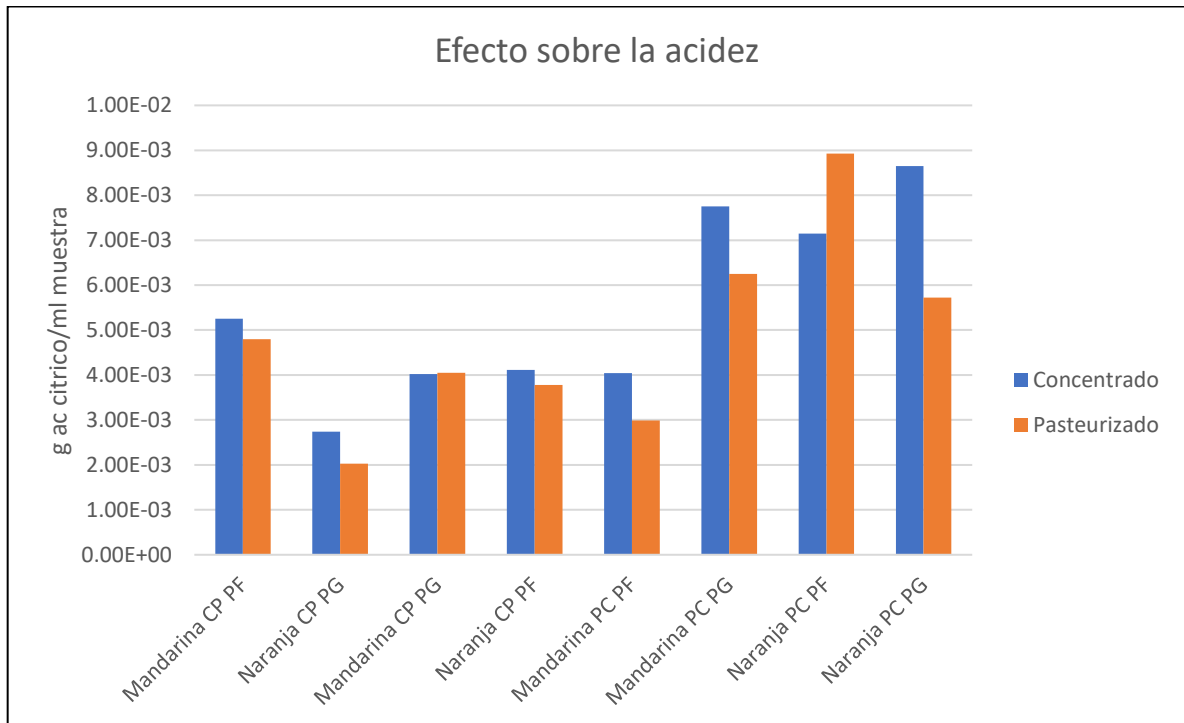


CP: Concentrado-Pasteurizado; PC: Pasteurizado-Concentrado; PG: Partícula Gruesa; PF: Partícula fina

Figura 9. Cambio total de color

3.2.2 Cambios de pH y acidez.

En la Figura 10 se presenta una gráfica que muestra las diferencias de acidez en función de la concentración de ácido cítrico, donde se puede observar que se tienen un mayor efecto en la acidez al realizar primero la pasteurización y después la concentración, que en los jugos en los que se realiza la concentración seguido de la pasteurización, donde no se muestra gran diferencia, debido a diferencia en la cantidad de agua del proceso. Con respecto al pH, este es un parámetro de control en la industria de jugos, respecto a los valores obtenidos, mostrados en el Cuadro 6, no se encontró mucha diferencia entre los valores obtenidos, Assawarachan & Noomhorm (2012) y Chandrasekaran et al (2013) reportan resultados donde a diferentes etapas de proceso, no observaron cambios significativos durante la pasteurización de jugo de naranja y piña.



CP: Concentrado-Pasteurizado; PC: Pasteurizado-Concentrado; PG: Partícula Gruesa; PF: Partícula fina

Figura 10. Efecto sobre la acidez

Cuadro 6. pH de los jugos en diferente etapa del proceso.

	Concentrado	Pasteurizado
Mandarina PF CP	3.87	3.90
Naranja PG CP	3.60	4.06
Mandarina PG CP	4.04	4.14
Naranja PF CP	4.12	4.20
Mandarina PF PC	3.61	3.75
Mandarina PG PC	3.73	3.77
Naranja PF PC	3.28	3.36
Naranja PG PC	3.57	3.55

PG: Partícula Gruesa; PF: Partícula fina; CP: Concentrado-Pasteurizado; PC: Pasteurizado-Concentrado

3.2.3 Efecto sobre la vitamina C.

En el Cuadro 7 se muestra la variación del contenido de vitamina C durante el proceso de evaporación al vacío y pasteurización por microondas donde se observa que el tratamiento por microondas degrada menos el contenido de ácido ascórbico, a diferencia del proceso de concentración, debido principalmente a que el tiempo de calentamiento es mayor en la evaporación, dando así suficiente tiempo para que la degradación de la vitamina sea mayor, a diferencia del calentamiento por microondas donde es más rápido.

Cuadro 7. Contenido de Ácido Ascórbico.

	mg Ac. Ascórbico/100g de muestra		
	Sin Procesar	Concentrado	Pasteurizado
Mandarina PF	58.1196	56.3584	49.5338
Naranja PG	50.6345	37.4255	28.6195
Mandarina PG	58.1196	41.3882	38.3061
Naranja PF	50.6345	41.8285	38.7464
	Sin Procesar	Pasteurizado	Concentrado
Mandarina PF	58.1196	44.03	41.3882
Naranja PG	50.6345	41.8081	31.7016
Mandarina PG	58.1196	52.836	45.7912
Naranja PF	50.6345	40.5076	35.6643

PG: Partícula Gruesa; PF: Partícula fina

Demirdöven & Baysal (2016), reportan valores de ácido ascórbico de jugo de naranja pasteurizado por microondas (40 ml/min, 900W) de 50.4 y 51.3 mg/100ml, teniendo como dato de control 55.4 mg/100ml. La disminución de este valor se explica por el incremento de la permeabilidad celular y porque la transferencia de componentes en los jugos se da más fácilmente. Vikram et al (2005) investigaron los efectos de diferentes tipos de calentamientos eléctricos en la degradación de la vitamina C, y encontraron que la mayor degradación por tratamientos de microondas se debe a la temperatura no controlable del proceso, también indicaron que el calentamiento óhmico fue el de mejores resultados.

3.3 Objetivo particular 3.

Para obtener los valores del coeficiente de transferencia de calor del lado del vapor (α_c), se usó la siguiente ecuación, $\alpha_c=5.56 (\Delta T)^2$ propuesta por Rohesenow & Hartnett, (1973) que se da en valores de W/m²°K y el valor del coeficiente de transferencia de calor del líquido en ebullición (α_b) se obtuvo del *Handbook of Food Processing Equipment* de Kostaropoulos & Saravacos (2016), siendo de 1480 W/m², con el cual se obtuvieron los datos siguientes:

Cuadro 8. Energía gastada durante la experimentación

Concentración (W)	Pasteurización (W)	Total (W)
4796.16441 M1*	1000	5796.16441
1863.56603 N1°		2863.56603
1630.92028 M1°		2630.92028
4579.69574 N1*		5579.69574
4674.49416 M2*		5674.49416
2076.46567 M2°		3076.46567
2159.88927 N2*		3159.88927
4930.37516 N2°		5930.37516

M: Mandarina, N: Naranja, 1: Concentrado-Pasteurizado, 2: Pasteurizado-Concentrado,
 *: Partícula fina, °: Partícula gruesa

Se observa que existen mayor gasto energético en aquellas corridas donde se utilizó un tamaño de partícula mayor, además de que los valores más pequeños son de los procesos en sentido concentrado-pasteurizado, debido a que la cantidad de agua a evaporar es menor a la del sentido pasteurizado-concentrado, evitando así pérdidas más significativas del proceso. En el sistema de microondas, todo el proceso se llevó acabo usando una potencia de 1000W, los cuales, se supuso que se aprovecharon totalmente debido a que esta clase de sistemas están diseñados de tal manera que siempre se aproveche su máxima capacidad, este dato se puede comparar contra lo presentado por Balkan et al (2005), donde la energía consumida en un evaporador de triple efecto fue de 21230 W para la concentración y pasteurización de jugo de naranja

Conclusiones

Se demostró la eficacia de la pasteurización por microondas aplicada a diferentes jugos cítricos, obteniendo un efecto térmico menor en los componentes de calidad en los jugos cítricos que aquellos tratados normalmente, como se ve al realizar un pretratamiento de concentración.

Un proceso de pasteurización por microondas, seguido por una concentración al vacío es una buena alternativa para la industria, debido a la disminución de volumen en el transporte, además de evitar pérdidas en tiempos de limpieza y usos de líquidos de servicio que tienen repercusiones económicas a nivel mundial.

A nivel experimental, los gastos energéticos de la evaporación al vacío y pasteurización por microondas demostraron un ahorro energético en comparación en aquellos donde se realizaron con evaporadores de triple efecto, según los resultados presentados por Balkan et al (2005).

Observaciones y Recomendaciones

Se recomienda un estudio bajo almacenamiento de jugos cítricos sometidos ante la pasteurización por microondas y evaporación al vacío, donde se observe pérdidas en aspecto de calidad y compararlo contra diferentes procesos térmicos convencionales, para tener un seguimiento de las ventajas de estas tecnologías emergentes.

Durante la experimentación, se recomienda realizar los procesos de la manera más rápida y continua para evitar pérdidas de calor.

Para el escalamiento a nivel industrial se recomienda el uso de materiales que logren aislar totalmente las microondas con el fin de evitar fugas para asegurar óptimas condiciones de trabajo.

Un sistema de flujo continuo para la pasteurización por microondas se recomienda para mejorar la transferencia de calor en el alimento, además de poder manejar cantidades de alimentos más grandes.

Referencias

- Agcam, E., Polat, S., Akyildiz, A., Fenercioglu, H. (2016). Inactivation kinetics of Pectin Methyl Esterase under Thermosonication and Thermal Pasteurisation Process Conditions in Orange Juice. *Academic Food Journal*, 14, 85-91.
- Agcam, E., Akyildiz, A., Akdemir-Evrendilek, G. (2014). Effects of PEF and heat pasteurization on PME activity in orange juice with regard to a new inactivation kinetic model. *Food Chemistry*, 165, 70-76.
- Aghajanzadeh, S., Ziaifar, A. M. (2018). A review of pectin methylesterase inactivation in citrus juice during pasteurization. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 1-12.
- Akyildiz, A.; Ağçam, E. (2014). Citrus Juice Technology. In: *Food Processing: Strategies for quality assessment* (Z. Erginkaya, S. Ahmad, H. Erten), pp 65-78. New York, USA: Springer.
- Assawarachan, R., Noomhorn, A. (2008). Effect of operating condition on the kinetic of color change of concentrated pineapple juice by microwave vacuum evaporation. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 6, 47-53.
- Assawarachan, R., & Noomhorn, N. (2012). Mathematical models for vacuum-microwave concentration behavior of pineapple juice. *Journal of Food Processing Engineering*, 35, 1485-1505.
- Balkan, F., Colak, N., Hepbasil, A. (2005). Performance evaluation of a triple-effect evaporator with forward feed using exergy analysis. *International Journal of Energy Research*, 29, 455-470.
- Berk, Z. (2013). Evaporation. In: *Food Process Engineering and Technology* (Taylor, S., ed) pp. 479-510. New York, USA: ElSeiver.
- Canterbury, C.O. (2016). UC Science. Retrived from: <http://www.canterbury.ac.nz/science/outreach/chemistry>. Consulted 18 September 2017.

- Carbonell, J.V., Contreras, P., Carbonell, L., Navarro, J.L. (2006). Pectin methylesterase activity in juices from mandarins, oranges and hybrids. *Food Research and Technology*, 222, 83-87.
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., & Basak, T. (2013). Microwave food processing-A review. *Food Research International*, 52, 243-261.
- Chanson-Rolle, A., Baresco, V., Chupin, J., Boulliot, L. (2016). Nutritional composition of orange juice: A comparative study between French commercial and home-made juice. *Food and Nutrition Sciences*, 7, 252-261.
- Chen, P., Deng, S., Cheng, Y., Lin, X., Metzgar, L., Ruan, R. (2010). Non-thermal food pasteurization process: an introduction. In: *Case studies in novel food processing technologies* (Doona, C., Kustin, K., Feeherry, F., eds) pp.1-18. Philadelphia, USA: Woodhead Publishing.
- Cinquanta, L., Albanese, D., Cuccurullo, G., Di Matteo, M. (2010). Effect on Orange juice of batch pasteurization in an improved pilot-scale microwave oven. *Journal of Food Science*, 75, 46-50.
- Cortés, C., Esteve, M.J., Frígola, A. (2008). Color of orange juice treated by High Intensity Pulsed Electric Fields during refrigerated storage and comparison with pasteurized juice. *Food Control*, 19, 151-158.
- Demirdöven, A., Baysal, T. (2016). Inactivation effect of microwave heating on pectin methylesterase in orange juice. *Ukrainian Food Journal*, 5, 248-411.
- Diamante, L., Durand, M., Savage, G., Vahanen, L. (2010). Effect of temperature on the drying characteristics, color and ascorbic acid content of green and gold kiwifruits. *International Food Research Journal*, 17, 441-451.
- Freese, H. (2014). Evaporation. In: *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook*. (C. Torado, H. Vogel, eds.), pp. 239-265. New York, USA: ElSeiver.

- Fruit Juice Focus (2017). USA-Fruit juice imports. Retrived from: <http://www.fruitjuicefocus.com/2017/> Consulted 15 January 2018.
- Gama, J., De Sylos, C. (2007). Effect of thermal pasteurization and concentration on carotenoid composition of Brazilian Valencia orange juice. *Food Chemistry*, 100, 1686-1690.
- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México: CECSA
- Gutierrez, G., Cambiella, A., Benito, J., Pazos, C., Coca, J. (2007). The effect of additives on the treatment of oil-in-water emulsion by vaccum evaporation. *Journal of Hazardous Materials*, 144, 649-654.
- Ibraz, A. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería en alimentos*. México: Mundi-Presa.
- Jaehwan, K., Ki-Baek, K. (2012). Review of microwave assisted manufacturing technologies. *International Journal of precision engineering and manufacturing*, 2263-2272.
- Kimball, D. (2002). *Procesado de cítricos*. 2ªed. Zaragoza, España: Editorial Acribia
- Kostaropoulos, A., & Saravacos, G. (2016). *Handbook of Food Processing Equipment*. Suecia: Springer.
- Lee, H.S., Coates, G.A. (2003). Effect of termal pasteurization on Valencia orange juice color and pigments. *LWT- Food Science and Technology*, 36, 153-156.
- Littley, D. (2015). The top 10 reasons to drink tangerine juice. Retrived from: <https://www.askchefdennis.com/i-love-tangerine-juice/>. Consulted 28 September 2017.
- McGorrin, R. (2002). Character Impact Compounds: Flavors and off-flavors in Foods. In: *Flavor, Fragance and Odor Analysis* (R. Marsili, ed.), pp 375-414. New York, USA: Marcel Dekker Inc.
- Mahboubeh, F., Ghazale, H., Zahra, E.D. (2013). Effects of heating method and conditions on the evaporation rate and quality atributes of black mulberry (*Morus nigra*). *Journal of Food, Scientists and Technologists*, 50, 35-43.

- National Advisory Committee on Microbiological Criteria for Food. (2006). Requisite scientific parameters for establishing the equivalence of alternative methods of pasteurization . *Journal Food Protection*, 5, 1190-1216
- Nienaber, U., Shellhammer, T.H. (2011). High-Pressure processing of orange juice: Kinetics of Pectinmethylesterase inactivation. *Journal of Food Science*, 66, 328-331
- Nikdel, S., Chen, C., Parish, M., MacKellar, D., & Friedrich, L. (1993). Pasteurization of Citrus Juice with Microwave Energy in a Continuous-Flow Unit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2116-2119.
- NOM-173-SCFI-2009. Jugo de frutas preenvasados. Denominaciones, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba. Norma Oficial Mexicana
- NOM-F-102-NORMEX-2010. Alimentos. Determinación de acidez titulable en alimentos. Método de ensayo. Norma Oficial Mexicana.
- Perconi, S., Flocke, R., Gunnewing, W. (2017) GEA Centrifuges for the Fruit-Processing and Juice Industries. Retrieved from: https://www.gea.com/en/binaries/centrifuges-in-fruit-juice-processing-gea_tcm11-41266.pdf. Consulted 05 September 2017.
- Rivas, A., Rodrigo, D., Martínez, A., Barbosa-Cánovas, G., & Rodrigo, M. (2006). Effect of PEF and heat pasteurization on the physical–chemical characteristics of blended orange and carrot juice. *LWT-Food Science and Technology*, 39, 1163–1170.
- Rohsenow, W., & Hartnett, J. (1973). *Handbook of Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill.
- SAGARPA (2017). Se consolida México como quinto productor mundial de naranja. Disponible en: http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/boletines/2017/enero/Documents/JAC_0015-10.PDF. Consultado 24 septiembre 2017.

- Sahin, S., & Gülüm, S. (2006). *Propiedades físicas de los alimentos*. Zaragoza, España: ACRIBIA.
- Sampedro, F., Rodrigo, D., Hendrickx, M. (2008). Inactivation Kinetics of Pectin Methyl Esterase Under Combined Thermal-High Pressure Treatment in an Orange Juice-Milk Beverage. *Journal of Food Engineering*, 86, 133-139
- Simpson, R. (2009). *Engineering aspects of thermal food processing*. New York, USA: CRC Press.
- Singh, P., Heldman, D. (2014) *Introduction to Food Engineering*. 5ed. New York, USA: Academic Press.
- STAN 247-2005. Norma general del codex para zumos (jugos) y néctares de frutas. Codex Alimentarius-FAO.
- Tajchakavit, S., & Ramaswamy, H. (1997). Continuous-Flow microwave inactivation kinetics of pectin methylesterase in orange juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 365-378.
- USDA (2017). National nutrient database for standard reference legacy release: Basic report Orange juice, raw. Retrieved from: [https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/301188?manu=&fgcd=&ds=&q=Orange%20juice,%20raw%20\(Includes%20foods%20for%20USDA%27s%20Food%20Distribution%20Program\)](https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/301188?manu=&fgcd=&ds=&q=Orange%20juice,%20raw%20(Includes%20foods%20for%20USDA%27s%20Food%20Distribution%20Program)). Consulted 25 september 2017
- USDA (2017). National nutrient database for estándar reference legacy release: Basic report Tangerine juice, raw. Retrieved from: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/301202?manu=&fgcd=&ds=&q=Tangerine%20juice,%20raw>. Consulted 25 september 2017.
- Vikram, V.B., Ramesh, M.N., Prapulla, S.G. (2005). Thermal degradation kinetics of nutrients in orange juice heated by electromagnetic and conventional methods. *Journal of Food Engineering*, 69, 31-40.

- Wei, X., Song, M., Chen, C., Tong, H., Liang, G., Gmitter Jr, F. G. (2018). Juice volatile composition differences between Valencia orange and its mutant Rhode Red Valencia are associated with carotenoid profile differences. *Food Chemistry*, 245, 223-232.
- Yam, K., Papadakis, S. (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61, 137-142.