



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUÍMICA
E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**

**ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE SECADO DE FRESA UTILIZANDO UN
HORNO DE MICROONDAS DOMÉSTICO**

TESIS

**PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL**

P R E S E N T A

SANTIAGO EMMANUEL BAAK LOPEZ

ASESOR:

M. C. ALFREDO GARCÍA DE LA CRUZ



MÉXICO D.F.

Junio, 2015

Reconocimiento

- Al Instituto Politécnico Nacional por ser la base para formarme como profesionalista y ser humano, ya que gracias a él obtuve una educación única para mi formación.
- A la Escuela Superior De Ingeniería Química e Industrias Extractivas en donde compartí sueños y metas con amigos y compañeros, que al igual que yo queremos ser líderes en el ámbito que nos encontremos en un futuro.
- A mi bachillerato, porque aunque ya tiene algunos años desde que salí, sigo recordando las oportunidades que éste me brindó para mi futuro como ser humano.

Santiago Emmanuel Baak López

Agradecimientos.

- A mis padres, con todos los buenos momentos que pasamos, las derrotas, las alegrías y las tristezas, los momentos que tenemos para recordar, las lágrimas y risas, y por todo lo que ha pasado por mi vida. Todo eso se los debo a ustedes por ser mí pasado, presente y mi futuro, que siempre han estado conmigo, mi más profundo agradecimiento.
- A mi hermanito, porque aunque de manera alterna, sus palabras de apoyo en los momentos difíciles, sus actos de cariño y soporte, siempre me fueron útiles. Gracias por estar conmigo, y tener todos esos recuerdos geniales y los que siguen.
- A mis abuelos, que aunque ellos no tienen los conocimientos técnicos, sus pláticas y experiencias fueron de gran soporte para mí.
- A mi asesor ya que si no fuera por él, este trabajo jamás hubiese sido culminado y haber estado como soporte y amigo en toda la carrera, esperando seguir en los años venideros de la misma forma.
- A todos mis amigos que han estado en las buenas y malas, y sin querer ya son parte de mi familia.

Santiago Emmanuel Baak López

Contenido

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| I. GENERALIDADES | 6 |
| I.1. FRESA | 6 |
| <i>I.1.1. Zonas y regiones productoras</i> | 7 |
| <i>I.1.2. Variedades</i> | 8 |
| <i>I.1.3. Variedades cultivadas en México</i> | 9 |
| I.2. SECADO | 11 |
| I.3. CINÉTICA DE SECADO | 13 |
| I.4. MICROONDAS | 16 |
| I.5. PROPIEDADES DIELECTRICAS | 19 |
| I.6. SECADO CON MICROONDAS | 22 |
| I.7. CINÉTICA DE SECADO CON MICROONDAS | 25 |
| I.8. ATRIBUTOS DE CALIDAD | 26 |
| II. MATERIALES Y MÉTODOS | 28 |
| II.1. MATERIA PRIMA | 28 |
| II.2. MÉTODOS | 29 |
| III. EXPERIMENTACIÓN | 30 |
| III.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL | 30 |
| IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 31 |
| IV.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DE SECADO | 31 |
| CONCLUSIONES | 40 |
| BIBLIOGRAFÍA | 41 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA I.1. FRESA..... | 6 |
| FIGURA I.2. PRINCIPALES ESTADOS PRODUCTORES DE FRESA EN LA REPÚBLICA MEXICANA..... | 7 |
| FIGURA I.3. VARIEDADES DE FRESA..... | 9 |
| FIGURA I.4. CAMPO SEMBRADO DE FRESA..... | 10 |
| FIGURA I.5. VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD..... | 13 |
| FIGURA II.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO..... | 28 |
| FIGURA IV.1. CURVA DE CINÉTICA DE SECADO DEL EXPERIMENTO 2..... | 31 |
| FIGURA IV.2. CURVA DE CINÉTICA DE SECADO DEL EXPERIMENTO 9..... | 32 |
| FIGURA IV.3. CURVA DE CINÉTICA DE SECADO DEL EXPERIMENTO 12..... | 32 |
| FIGURA IV.4. CURVA AJUSTADA DE CINÉTICA DE SECADO DEL EXPERIMENTO 2..... | 33 |
| FIGURA IV.5. CURVA AJUSTADA DE CINÉTICA DE SECADO DEL EXPERIMENTO 9..... | 33 |
| FIGURA IV.6. CURVA AJUSTADA DE CINÉTICA DE SECADO DEL EXPERIMENTO 12..... | 34 |
| FIGURA IV.7. CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO DEL EXPERIMENTO 2..... | 34 |
| FIGURA IV.8. CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO DEL EXPERIMENTO 9..... | 35 |
| FIGURA IV.9. CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO DEL EXPERIMENTO 12..... | 35 |
| FIGURA IV.10. FOTOGRAFÍAS DEL PRODUCTO DEL EXPERIMENTO 16..... | 36 |
| FIGURA IV.11. FOTOGRAFÍAS DEL PRODUCTO DEL EXPERIMENTO 2..... | 36 |
| FIGURA IV.12. FOTOGRAFÍAS DEL PRODUCTO DEL EXPERIMENTO 9..... | 37 |
| FIGURA IV.13. FOTOGRAFÍAS DEL PRODUCTO DEL EXPERIMENTO 12..... | 37 |
| FIGURA IV.14. CURVAS DE CINÉTICA DE SECADO A INTERVALOS DE TIEMPO DE 30 Y 50 SEGUNDOS Y UN NIVEL DE POTENCIA DEL 30%..... | 38 |
| FIGURA IV.15. CURVAS DE CINÉTICA DE SECADO A INTERVALOS DE TIEMPO DE 10 Y 20 SEGUNDOS Y UN NIVEL DE POTENCIA DEL 60%..... | 39 |
| FIGURA IV.16. CURVAS DE CINÉTICA DE SECADO A INTERVALOS DE TIEMPO DE 10, 20, 15 Y 25 SEGUNDOS RESPECTIVAMENTE Y UN NIVEL DE POTENCIA DEL 70%..... | 39 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| TABLA I.1. MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS A LAS CURVAS DE SECADO. | 15 |
| TABLA I.2. UNA SELECCIÓN DE PROPIEDADES DIELECTRICAS PUBLICADAS MUESTRAN LA INFLUENCIA DE LA HUMEDAD (MC), SAL/CENIZAS (SA), GRASA/LÍPIDOS (FL) EN LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS. | 21 |
| TABLA II.1. CARACTERÍSTICAS DEL HORNO DE MICROONDAS UTILIZADO. | 29 |
| TABLA IV.1. NÚMERO DE EXPERIMENTO, ECUACIÓN GENERADA, COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (R^2) Y POR CIENTO DE HUMEDAD. | 31 |

Resumen

El secado es uno de los métodos más empleados en la conservación de alimentos debido a que por medio de él, la humedad de dichos productos es parcialmente removida y con esto se logra que aumente su vida de anaquel.

La fase de experimentación se conformó de dos partes: la fase preliminar (tres experimentos), en donde se tomaron datos relacionados de cómo se comportaba la fresa al ser secada en un horno de microondas y observar cuál es el tamaño de espesor más adecuado. En la segunda fase, se realizaron diecisiete experimentos, en los cuáles las variables que intervienen en este tipo de secado son, intervalos de tiempo y nivel de potencia. El nivel de potencia fue entre treinta y ochenta por ciento y los intervalos de tiempo entre diez y cincuenta segundos.

Conforme a los resultados obtenidos, las mejores condiciones de operación para el secado de fresa fueron en los experimentos dos, nueve y doce; cuyos niveles de potencia fueron treinta, cincuenta y sesenta por ciento, y los intervalos de tiempo de cuarenta, treinta y treinta segundos respectivamente.

Se seleccionaron los experimentos antes mencionados en base a sus coeficientes de correlación (0.9913, 0.9877 y 0.9824), y la humedad final del producto (6.75%, 0.91% y 1.78%).

El comportamiento de la curva de cinética de secado tuvo una tendencia característica para este tipo de proceso, en la cual se presentan los tres tipos de periodos de velocidad de secado, dichas curvas se obtuvieron gráficamente, al igual que sus ajustes respectivos y las curvas de velocidad de secado por medio del software Origin Pro 8.0.

Introducción.

Las frutas y verduras son fuentes importantes de nutrientes esenciales en la dieta tales como vitaminas, minerales y fibra. Dado que el contenido de humedad de las frutas y verduras frescas es superior al 80%, son productos clasificados como altamente perecederos (Orsay y colaboradores, 2006). Mantener el producto fresco es la mejor manera de mantener su valor nutricional, pero la mayoría de las técnicas de almacenamiento requieren temperaturas bajas, que son difíciles de mantener a lo largo de la cadena de distribución. Por otro lado, el secado es una alternativa apropiada para el manejo post-cosecha, especialmente en países del tercer mundo, donde existen mala distribución a temperatura baja en los establecimientos y el manejo de las instalaciones. Cabe señalar que más del 20 % de la cosecha mundial de perecederos son secados para aumentar la vida de anaquel y promover la seguridad alimentaria (Grabowski y colaboradores, 2003). Frutas y verduras son secados para mejorar la estabilidad de almacenamiento, reducir los requerimientos de embalaje y reducir el peso del transporte. En la India apenas parte de los productos perecederos se secan lo que conduce a la pérdida enorme en términos de dinero y trabajo, además de fuerte aumento de los precios de los productos básicos durante la temporada baja.

Las frutas y verduras de temporada están disponibles en cantidades abundantes en determinadas épocas del año. En temporada alta, los precios de venta son por lo general mínimos y esto puede conducir a menores beneficios o incluso pérdidas para el productor. Además, debido a la abundante oferta durante la temporada, un exceso en el mercado puede resultar en el deterioro de grandes cantidades. La preservación de estas frutas y verduras puede prevenir el enorme desperdicio y ponerlos a disposición fuera de temporada a precios remunerativos (Prakash y colaboradores, 2004).

Las fresas son frutas populares cultivadas en muchos países. Podrían ser consumidas en forma fresca o en muchas otras formas (jugo, mermelada concentrada, jalea y secos rehidratados con yogur y como ingrediente en productos de panificación) (El-Beltagy y colaboradores, 2007).

El desarrollo de nuevos productos de fruta seca, de alta calidad y atractivos al consumidor es necesario para ampliar la disponibilidad del producto y diversificar los mercados, sobre todo porque el consumo de fruta fresca esta generalmente abajo de los niveles recomendados en una dieta normal (Contreras y colaboradores, 2008).

Una operación unitaria ampliamente usada en la industria alimenticia es el secado con aire caliente, que es un proceso de transferencia simultánea de calor y masa, acompañada por cambio de fase (Barbanti y colaboradores, 1994).

El hombre ha estado secando los alimentos para su conservación desde el comienzo de la historia. Éste "arte de vivir", ha dependido principalmente del sol, por lo que se ha visto muy influenciado por el clima, por lo que es difícil de conseguir una calidad uniforme. Sin embargo, este método de secado natural sigue siendo un método popular para la

conservación de los alimentos hasta el comienzo del siglo XX, cuando fue reemplazado por el secado mecánico (Hayashi, 1989).

La conservación de frutas y verduras a través del secado se remonta a muchos siglos y está basado aplicando la energía solar. La mala calidad y contaminación del producto conducen al desarrollo de tecnologías alternativas de secado (Bezyna y Kutovoy 2005). El método más aplicable de secado incluye: liofilización, a vacío, osmótico, en gabinete o bandeja, lecho fluidizado, lecho de chorro, óhmico, por microondas y la combinación de ellos (George y colaboradores, 2004). A excepción de la liofilización, la aplicación de calor durante el secado por conducción, convección y radiación son las técnicas básicas utilizadas para forzar el agua a vaporizarse, mientras que el aire forzado es aplicado para estimular la eliminación de vapor. Un gran número de alimentos y biomateriales son deshidratados en una variedad de equipos con diferentes condiciones de operación. La selección del método de secado depende de varios factores tales como el tipo de producto, la disponibilidad del secador, el costo de la deshidratación y la calidad final del producto deshidratado. El consumo de energía y calidad de los productos secos son otros parámetros críticos en la selección de un proceso de secado. Para reducir el uso de combustibles fósiles, la energía eléctrica es una fuente alterna de energía para aplicaciones de secado especialmente donde la electricidad es generada por una fuente de energía renovable como la energía hidroeléctrica o la eólica (Raghavan y Orsat 1998, Raghavan y colaboradores, 2005).

El secado de frutas y verduras se ha realizado principalmente por secado convectivo (Nijhuis y colaboradores, 1998). Hay una serie de estudios que han abordado los problemas asociados con el secado convencional por convección. Algunas propiedades físicas importantes de los productos han cambiado, tales como la pérdida de color (Chua y colaboradores, 2000), el cambio en la textura, cambios químicos, afectando el sabor y los nutrientes, y el encogimiento (Mayor y Sereno, 2004). Además, el secado convectivo da poco margen para una buena rehidratación después del secado obteniendo una mínima calidad (Khraisheh y colaboradores, 2004). La alta temperatura del proceso de secado es una causa importante para la pérdida de calidad. La reducción de la temperatura del proceso tiene un gran potencial para mejorar la calidad de los productos secos (Nindo y colaboradores, 2003; Beaudry y colaboradores, 2004). Sin embargo, en tales condiciones, el tiempo de operación y el costo asociado llega a ser inaceptable. Para reducir el costo de operación existen diferentes pre-tratamientos y un nuevo método a baja temperatura y bajo consumo de energía son métodos de nueva generación.

El uso de calor a través de las operaciones de procesamiento térmico, que entre otros incluye la pasteurización, esterilización, secado y evaporación, sigue siendo una práctica común de las industrias alimenticias con el fin de garantizar la ausencia de actividad microbiológica de sus productos. Estos métodos tradicionales de calentamiento se basan fundamentalmente en la generación de calor fuera del producto a ser calentado, por gases de combustión o por un calentador de resistencia eléctrica, y su transferencia en el producto a través de los mecanismos de conducción y convección. Sin embargo, estas formas de procesamiento están todavía limitadas debido a las considerables pérdidas de calor en las superficies de los equipos e instalaciones, la reducción de la eficiencia de transferencia de calor y el daño térmico por sobrecalentamiento, debido al tiempo requerido para conducir

suficiente calor hacia el centro térmico de los alimentos. Algunos de estos efectos están siendo atenuados a través de desarrollos en los sistemas de control y monitoreo para plantas de procesamiento de alimentos, diseño inteligente de equipos e instalaciones, reciclamiento de calor y medidas de aislamiento, pero esto también representa altos costos de financiamiento adicional. Por lo tanto, los esfuerzos de los procesadores junto con círculos académicos en atención al consumidor demanda alimentos de alta calidad para hacer frente a elevar el nivel económico, y hoy en día sobre todo con las preocupaciones ecológicas, ha provocado el desarrollo de tecnologías emergentes recientes para el procesamiento de alimentos. Recientemente, las tecnologías electromagnéticas en el procesamiento de alimentos han adquirido mayor interés industrial y tienen potencial para sustituir, al menos parcialmente, los procesos tradicionales de conservación bien establecidos (Vicente y Castro, 2007). El calentamiento óhmico y el dieléctrico, que incluye calentamiento por radiofrecuencia (RF) y por microondas (MW), son prometedoras alternativas para los métodos convencionales de procesamiento térmico. Estas nuevas tecnologías térmicas son consideradas como formas volumétricas de calentamiento en la cual la energía térmica es generada directamente en el interior del alimento. Este patrón común de generación de calor permite minimizar los tiempo de cocción y, por consiguiente puede obtener consecuencias directas en términos de eficiencia energética y calentamiento.

El desarrollo de nuevos productos de alta calidad como las frutas secas atractivas para el consumidor es necesario para ampliar la disponibilidad del producto y diversificar los mercados, sobre todo porque el consumo de fruta fresca está generalmente por debajo de los niveles recomendados en la dieta normal. El secado con aire caliente es el método más común para conservar los alimentos, este proceso conduce a que el sabor del producto y los nutrientes (vitaminas) sean seriamente dañados, debido a los largos tiempos de secado y las altas temperaturas empleados en la práctica (Alibas y colaboradores, 2005). Para reducir estos problemas, procesos de secado más rápidos y más eficaces tales como la aplicación de microondas pueden ser considerados para la deshidratación de alimentos (Prothon y colaboradores, 2001; Schiffmann, 2001; Ruiz-Díaz y colaboradores, 2003; Piotrowski y colaboradores, 2004). Zhang y colaboradores,(2006), han revisado investigaciones recientes sobre el secado por microondas, centrándose principalmente en frutas y verduras. Estos autores sugieren que todavía falta un análisis teórico en el modelado y la simulación en el ámbito de los procesos de secado relacionados con la combinación de microondas. Los modelos matemáticos pueden jugar un papel importante en el diseño y control de los parámetros del proceso durante el secado, y realizando simulaciones a través de modelos cinéticos precisos pueden contribuir a la optimización del proceso (Khraisheh y colaboradores, 2000). Los modelos de procesos validados por experimentos predicen la influencia de los parámetros más relevantes sobre el tiempo de secado, y ayudan a mejorar la eficiencia energética de las diferentes combinaciones de los procedimientos de secado (Zhang y colaboradores, 2006). El patrón de cinética tradicional observado durante el secado con aire cambia drásticamente cuando las microondas se aplican. Varios modelos de transferencia de calor y masa han sido mostrados para aplicarse durante los procesos de secado con aire combinados con microondas. Pero la mayoría de los modelos son difíciles de aplicar (Khraisheh y colaboradores, 2000; McMinn y colaboradores, 2003; Andrés y colaboradores, 2004) lo que limita su aplicación práctica bajo diferentes condiciones de secado. Una ecuación exponencial más simple propuesta por Ruiz-Díaz y colaboradores, (2003) se ha

aplicado para modelar la cinética de secado combinado con aire-microondas de manzana y fresa.

Por otro lado, hay muchos informes que afirman la existencia de efectos (no térmicos), y estos desafíos suponen que el efecto térmico (calentamiento) es el único factor que debe considerarse cuando la radiación por microondas se absorbe (Bohr y Bohr, 2000; de Pomerai y colaboradores, 2003; Jacob y colaboradores, 1995; Pagnotta y colaboradores, 1993; Porcelli y colaboradores, 1997; Velizarov y colaboradores, 1999). Una amplia investigación se ha llevado a cabo para determinar si los efectos atérmicos están asociados con la radiación por microondas, y para medir la magnitud del fenómeno, si existe.

El desarrollo de tecnologías de secado es importante para los productos alimenticios y agrícolas, especialmente en las últimas dos décadas (Mujumdar, 2000). La deshidratación reduce el deterioro (físico, químico y microbiológico), aumenta la vida de anaquel, reduce la masa del producto y da valor agregado tal como es, sin tratamientos químicos.

Actualmente las industrias de alimentos están sometidas a importantes retos como la internacionalización de los mercados y la globalización de la economía, lo que provoca una alta competencia y fuerza a las industrias a la innovación constante, la evolución tecnológica y para responder con eficiencia a los cambios de hábitos de un consumidor exigente. Por lo tanto, las industrias han enfocado sus esfuerzos en dos áreas principales: las innovaciones del proceso y de productos. La innovación de proceso conduce a la aplicación de nuevas tecnologías. Mejoras en el proceso produce seguridad y productos de alta calidad que están directamente relacionados con las exigencias del consumidor. En este contexto, los sensores modernos juegan un papel importante y suponen un gran avance para el control de las propiedades concretas de los alimentos. Estos sensores se basan en la radiación electromagnética, ultrasonido y técnicas de resonancia. Algunas aplicaciones industriales se están desarrollando y los esfuerzos se están realizando con el fin de obtener sensores para el control de calidad de los alimentos directamente en la línea de proceso y de una manera no destructiva (Castro-Giráldez y colaboradores, 2010).

En la industria panificadora el producto final con humedad intermedia y alta son propensos a una descomposición microbiana rápida, particularmente el crecimiento de mohos, lo que limita en gran medida su vida de anaquel (Liu y colaboradores, 2009). Por lo tanto, los métodos para controlar el deterioro microbiano son de gran importancia en esta industria. El calentamiento por microondas se ha estudiado como un medio para controlar el crecimiento de mohos y extender la vida de anaquel de los productos finales de panadería (Tang y colaboradores, 2005; Lakins y colaboradores, 2008). La aplicación del calentamiento por microondas es de particular interés debido a las eficiencias operativas que éste ofrece. El mecanismo único de calentamiento por microondas permite ahorros de energía grandes en muchos casos, así como beneficios no obtenidos a partir de otros métodos más convencionales. Como el uso del calentamiento por microondas en el procesamiento de alimentos ha aumentado, es necesario para su aplicación con éxito una mejor comprensión de la interacción de las microondas con los materiales alimenticios.

La tecnología de microondas utiliza ondas electromagnéticas que pasan a través del material y causa en sus moléculas la oscilación y fricción generando calor. El calentamiento

por microondas genera calor en el interior del material y calienta todo el volumen más o menos a la misma velocidad (Sagar y Suresh, 2010).

Los objetivos del trabajo son:

Objetivo general:

- Estudiar la cinética del proceso de secado de la fresa, utilizando diferentes intervalos de tiempo y diferentes niveles de potencia de microondas.

Objetivos específicos:

- Obtener las mejores condiciones de operación (tiempo de secado y nivel de potencia del horno).
- Obtener el menor porcentaje de humedad en el producto final.
- Observar los tres períodos de velocidad de secado.

I. Generalidades.

I.1. Fresa.

La Fresa (*Fragaria vesca*) (Figura I.1) es nativa de las regiones templadas en el mundo y se cultiva en grandes cantidades, tanto con fines comerciales como por parte de horticultores aficionados [1]. Pertenece a la familia rosaceae y al género de fragaria que comprende, tanto a especies de origen europeo (F. vesca, F. Moschata duchesne y la F virides duchesne), las cuáles se caracterizan por sus frutos pequeños, así como las de origen americano (F. chiloensis duchesne y F. Virginiana dúchense), las cuáles tienen frutos de tamaño grande [2]. Las flores blancas se organizan en cimbras y tienen cáliz de cinco piezas hendidas, cinco pétalos redondeados, numerosos estambres y pistilos. El fruto es el resultado de la agregación de muchos carpelos secos diminutos sobre un receptáculo pulposo hipertrofiado de color rojo escarlata, es muy apreciado por su sabor. La planta de fresón es de tipo herbáceo y perenne. El sistema radicular es fasciculado, se compone de raíces y raicillas. En condiciones óptimas pueden alcanzar los 2 a 3 m, aunque lo normal es que no sobrepasen los 40 cm, encontrándose la mayor parte (90%) en los primeros 25 cm. El consumo humano en fresco y congelado. Las fresas se deben lavar antes de quitarles el rabillo, ya maduras se consumen al natural, con azúcar o nata, constituyen un postre delicioso [1].



Figura I.1. Fresa

La fresa contiene diversos azúcares, entre los que destacan la glucosa y la sacarosa, contiene vitamina B1, B2 y gran cantidad de vitamina C, aunque esta disminuye cuando los frutos se dañan física y químicamente. También, se presentan algunos ácidos orgánicos (cítrico, tartárico y salicílico) [2].

Se emplean en pastelería (tartas, mousses, suflés), así como en confitería. También se elaboran mermeladas y jaleas. Pierden la textura cuando se congelan, aunque conservadas de esta manera se usan en una gran variedad de postres [1].

I.1.1. Zonas y regiones productoras [3].

La familia rosaceae cuenta con numerosas especies distribuidas en las zonas templadas de América, Europa y Asia y su fruto es muy apreciado por su sabor, aroma y propiedades nutritivas y por sus características: poroso, ligero, con una pulpa olorosa y ligeramente acuosa.

En México el cultivo de la fresa tiene sus inicios a mediados del siglo pasado en el estado de Guanajuato, contando en esa época con variedades francesas de la región de Lyon. La producción era incipiente y solamente cubría los requerimientos del mercado interno; En 1950 comenzó la demanda de los Estados Unidos, por lo que su importancia aumentó ya que los estadounidenses la requerían para complementar su consumo en la temporada de invierno. Así se originó la instalación de congeladoras y empacadoras en la región fresera de Guanajuato y se extendió al estado de Michoacán.

México registró en 2008 una superficie cultivada de fresa de 6,214 hectáreas (Ha), obteniéndose una producción de 208,932.25 toneladas métricas (Ton), por lo que alcanzó un rendimiento promedio de 33.86 toneladas por hectárea.

La fresa se cultiva en 12 estados de la república, las principales entidades productoras (Figura I.2) de esta frutilla son Baja California, Guanajuato, Estado de México y Michoacán; en esta última entidad se concentra la mayor producción nacional con una superficie cultivada de 3,215 Ha y una producción superior a las 106,905 Ton, seguido por el estado de Baja California con una superficie de 1,355 Ha y una producción de 70,410 Ton; el estado de Guanajuato con una superficie de 1,048 Ha y una producción de 18,065 Ton y por último el estado de México con una superficie de 244 Ha y una producción de 5,068 Ton.

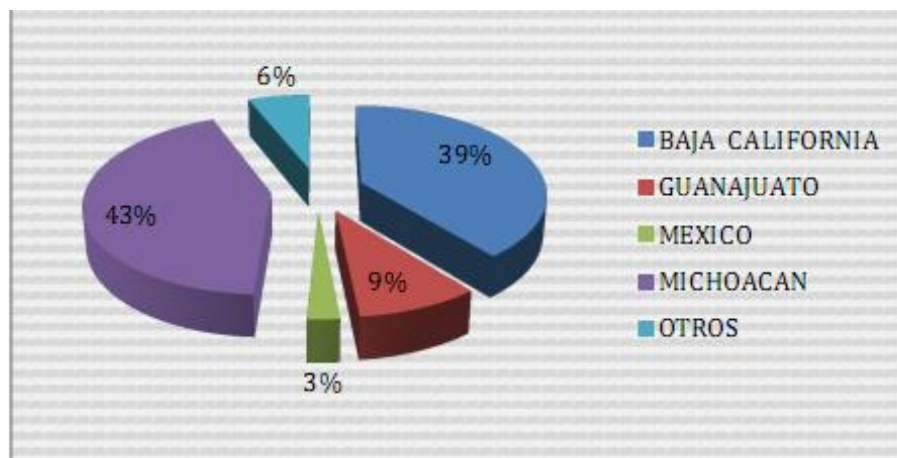


Figura I.2. Principales Estados productores de fresa en la República Mexicana.

I.1.2. Variedades [2].

Se conocen en el mundo más de 1000 variedades de fresa (Figura I.3), producto de la gran capacidad de hibridación que presenta la especie. A continuación se mencionan algunas variedades y sus características principales.

- Camarosa

Es una variedad de día corto que presenta un fruto grande, muy precoz, de color rojo brillante externamente, interior muy coloreado y de buen sabor y firmeza. Esta variedad es originada en la Universidad de California. Su densidad es de 5 plantas por metro lineal.

- Tudla

Esta variedad se caracteriza por su buena aptitud para el transporte, así como su resistencia a la clorosis férrica, por lo que resulta útil en zonas que presentan problemas de aguas salinas. La planta es vigorosa de follaje erecto, producción precoz, frutos grandes, aromáticos, alargados, de color rojo intenso, tanto externa como internamente. Su productividad es elevada y se adapta bien tanto a la plantación con planta fresca en zonas cálidas, como a la plantación con planta frigoconservada en zonas de invierno frío.

- Oso Grande

Variedad californiana, cuyo inconveniente es la tendencia del fruto al rajado. No obstante presenta buena resistencia al transporte y es apto para el mercado en fresco. De color rojo anaranjado, forma de cuña achatada, calibre grueso y buen sabor. La planta es vigorosa y de follaje oscuro. En zonas cálidas bajo protección de plástico, se transplanta con plantas producidas en viveros de altitud durante octubre para producción a finales de invierno. En zonas de invierno frío, el trasplante se realiza durante el verano para producción en el año siguiente a principios de primavera. La densidad de plantación es normalmente de 6 a 7 plantas por metro, colocadas en caballones cubiertos de plásticos, con riego localizado y líneas pareadas.

- Cartuno

Fruto de forma cónica perfecta, con calibre uniforme, color rojo brillante, sabor azucarado, ligeramente más precoz que Oso Grande, con curva de producción homogénea durante toda la campaña. Bien adaptada a plantaciones de otoño y de verano. Resistente a la clorosis férrica. Planta vigorosa, de follaje importante, con flores destacadas del mismo.

- Carisma

Variedad muy vigorosa y rústica, capaz de adaptarse a todo tipo de suelos y climas, precoz y muy productiva. El fruto es de forma cónica, a veces acostillada, de gran tamaño y color rojo suave. Se recomienda para plantación en otoño como planta fresca y en verano como planta frigoconservada.

Otras variedades de son: la Tioga, Fresno, Talismán, Chandler y Douglas.



Figura 1.3. Variedades de Fresa.

I.1.3. Variedades cultivadas en México [3].

En México se cultivan diferentes variedades, cada una con características específicas; y con diferentes rendimientos debido a: épocas de producción, resistencias a plagas y enfermedades, sabor, color, tamaño. Las variedades se pueden expresar de distintas formas dependiendo de la región donde se establezcan estas. Cabe mencionar que las variedades utilizadas en México han sido desarrolladas por la Universidad de California USA y Universidad de Florida USA.

La “Planta Madre” de fresa se importa de Estados Unidos de Norteamérica y al llegar a México se establece en viveros para su reproducción y posterior trasplante en las áreas comerciales, donde se desarrollará hasta lograr la producción final. Entre las variedades más utilizadas en México se encuentran la “Festival”, “Sweet Charlie”, “Galexia”, “Camino Real”, “Albión”, “Camarosa”, “Aromas”, “Ventana” y “Diamante”, que mediante varios ciclos han demostrado su eficiencia en campo, existen otras variedades pero con bajos rendimientos debido a, susceptibilidad a plagas y enfermedades, entre otras.

Se puede sembrar en eras o en lomillos (Figura 1.4). Sin embargo, por el tipo de tecnología que se aplica al cultivo, como es la utilización de coberturas y riego, lo más recomendable es hacerlo en eras de 70 a 80 cm de ancho y de 20 cm de altura. En cada era se colocan dos hileras de plantas, separadas 40 cm entre sí y las plantas a 30 cm, con este sistema se obtiene una densidad entre 50,000 y 55,000 plantas por hectárea. La separación entre ellas debe ser de por lo menos 40 cm, la planta debe sembrarse a una profundidad tal que el cuello de la raíz quede a nivel de suelo, de manera que no queden raíces expuestas ni la corona enterrada [1].



Figura I.4. Campo sembrado de Fresa

La mayoría de las frutas son consumidas frescas, pero su disponibilidad en el mercado es comúnmente limitada por la corta vida de anaquel y la temporada de producción durante el año. Además, fresas frescas tienen una vida de anaquel corta, incluso menos de una semana (Lara y colaboradores, 2004), principalmente debido al ataque de hongos y de daños mecánicos durante la distribución. En este sentido, los métodos de conservación que alargan la vida de anaquel de la fresa, aumentando su disponibilidad en el mercado, tales como la congelación, liofilización, deshidratación, etc., son muy útiles (Suutarinen y colaboradores, 2000; Moraga y colaboradores, 2004). Sin embargo, todos ellos inducen a la modificación de los atributos de calidad de la fruta (textura, color y sabor) a una medida diferente.

I.2. Secado.

Los productos de origen biológicos cosechados son diversos en sus propiedades físicas, químicas y bioquímicas. Una gran variedad de secadores se han desarrollado para deshidratar y conservar estos productos para satisfacer los diferentes requisitos de calidad y costo. Más de 500 tipos de secadores han sido reportados en la literatura técnica, y alrededor de 100 tipos están disponibles comercialmente. Las diferencias en el diseño del secador se deben a diferentes atributos físicos del producto, diferentes modos de alimentación de calor, diferentes temperaturas y presiones de operación, diferentes especificaciones de calidad sobre el producto seco, etc. (Carreño-Olejua y colaboradores, 2010). La mayoría de los sólidos manufacturados se secan al menos una vez durante su fabricación, haciendo del secado una de las operaciones unitarias más importantes en la industria (Kisakürek, 1995). La mayoría de los secadores convencionales utilizan aire caliente como medio secante, la convección, como el modo simple de transferencia de calor, y son operados a presión atmosférica bajo condiciones constantes. Para capacidades menores y tiempos de secado más grandes (por ejemplo, secadores solares), se prefiere la operación por lotes por obvias razones. Los secadores convencionales que se encuentran en la industria alimenticia son secadores por aspersión, liofilizadores, secadores a vacío, secadores de charolas/bandejas, secadores rotatorios, secadores de lecho fijo, secadores de lecho fluidizado, etc. (Carreño-Olejua y colaboradores, 2010).

El secado es un método clásico de conservación de alimentos y es una operación compleja de procesamiento de alimentos debido principalmente a los cambios indeseables en la calidad del producto seco. El objetivo básico en el secado de productos agrícolas es la eliminación de agua en ellos, hasta cierto nivel, en el que el deterioro microbiano y las reacciones químicas no deseadas se minimizan (Saciik y Elicin 2006). Durante el secado, el agua se transfiere desde el interior de las células del alimento a través de las membranas y paredes celulares para luego difundirse dentro de la estructura porosa hacia el medio de secado (Márquez y De Michelis, 2011). Por otra parte, se produce una reducción sustancial en el peso y el volumen, minimizando los costos de embalaje, almacenamiento y transporte, y permite la capacidad de almacenamiento del producto a temperatura ambiente (Doymaz, 2008).

En particular, el secado por convección con aire caliente se emplea ampliamente como una técnica de conservación (Al-Harahsheha y colaboradores, 2009), siendo el método más popular aplicado para reducir el contenido de humedad de las frutas y verduras (Lewicki, 2006), productos agrícolas y hierbas (Mujumdar y Chung, 2010). Sin embargo, utilizando este método, los materiales alimenticios están expuestos a elevadas temperaturas de secado, lo que conduce a un aumento en el encogimiento que es el resultado del colapso del tejido causado por la reducción de volumen debido a la pérdida de humedad, así como la presencia de las fuerzas internas (Sjöholm y Gekas, 1995; Mayor y Sereno, 2004) y dureza, el encogimiento puede ocurrir debido a que el tejido no es capaz de retener en su red estructural, colapsando cuando los espacios anteriormente ocupados por agua se vacían y vuelven a llenarse con aire. Además, el efecto de endurecimiento, implica el encogimiento de la superficie acompañada por la migración de sólidos disueltos hacia el alimento, puede influir en él (Panyawong y Devahastin, 2007). Los gradientes de humedad dentro del material inducen a esfuerzos micro-estructurales, lo que lleva al encogimiento y deformación. Por lo

tanto, el estudio del encogimiento de los tejidos biológicos del conocimiento de la estructura celular es muy difícil, pero su cálculo es, sin embargo, muy importante para predecir la cinética de secado, donde el cambio de la dimensión del producto desempeña un papel esencial (Márquez y De Michelis, 2011).

El endurecimiento está fuertemente influenciado por la temperatura y puede reducir el efecto de la temperatura del aire de secado dependiendo del tiempo empleado (Falade y Abbo, 2007), la reducción tanto de la densidad aparente y capacidad de rehidratación del producto seco y también causa graves daños al sabor, color y contenido nutritivo (Maskan, 2000).

La principal desventaja del secado convectivo con aire caliente, es que se emplea más tiempo, mayor temperatura y por lo tanto, consumo de energía alto, que puede ser tan alto como 6,000 kJ/kg de agua evaporada (Alibas, 2007; Mujumdar y Menon, 1995).

El propósito de reducir el contenido de agua es prolongar la vida de anaquel del producto de origen biológico mediante la reducción de la actividad de agua a un nivel lo suficientemente bajo. Algunos productos de origen biológico, tales como hierbas, han sido secados antes de extraer los ingredientes activos. (Mujumdar y Chung, 2010).

La mayoría de las contribuciones publicadas proponen el estudio del problema práctico, es decir, que ellos involucran la evaluación de las curvas de secado en condiciones controladas, que se predice con los modelos empíricos preferentemente simples, teniendo en cuenta los cambios en el volumen y/o superficie en el producto con respecto a sus valores iniciales (Márquez y De Michelis, 2011).

I.3. Cinética de secado.

El estudio de la cinética de secado es esencial para diseñar un correcto proceso de secado que permite además, obtener un producto de calidad. Por otro lado un buen modelo matemático del proceso de secado puede considerarse como una herramienta muy eficiente para salvar obstáculos, tales como, daños al producto, consumo excesivo de energía, desgaste o la disminución del rendimiento del equipo (Olivas y colaboradores, 1999).

El modelado matemático juega un papel importante en el diseño y control de los parámetros de proceso durante el secado, y la realización de simulaciones usando modelos cinéticos precisos puede contribuir a la optimización del proceso (Khraisheh y colaboradores, 2000). Los modelos de procesos validados por experimentos deberían predecir la influencia de los parámetros más relevantes sobre el tiempo de secado, y ayudar a mejorar la eficiencia energética de diferentes combinaciones de los procesos de secado (Zhang y colaboradores, 2006).

La curva característica de cinética de secado se muestra en la Figura I.5.

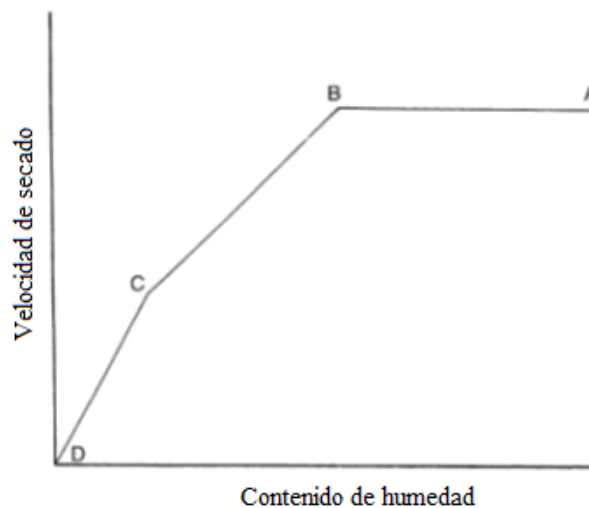


Figura I.5. Velocidad de secado en función del contenido de humedad.

Para un proceso por lote, la velocidad de secado varía con el contenido de humedad del material. La Figura I.5 es una curva algo idealizada pero sirve para ilustrar las diferentes etapas de secado que pueden ser identificadas. Este tipo de curva se puede obtener experimentalmente midiendo la masa de una muestra siendo secada como una función del tiempo. El cambio en la masa de la muestra está dado por un intervalo dividido en segmentos iguales de velocidad de secado. El contenido de humedad del material puede obtenerse de la masa a cualquier tiempo dado y el conocimiento del peso final de la muestra seca (Smith, 2011).

En el periodo de velocidad constante (A-B en la Figura I.5), la velocidad de secado es constante cuando el contenido de humedad es reducido. Durante este período de secado tiene lugar desde una superficie saturada y las moléculas de vapor de agua se difunden a

través de una película delgada estacionaria del aire próximo a la superficie del material antes de ser transportado a la corriente de aire. Esta película de aire contiene todas las resistencias a la transferencia de masa. Consecuentemente, debido a que el vapor de agua se elimina dejando, una superficie libre de humedad, las velocidades de secado para diferentes materiales son muy similares bajo las mismas condiciones (por ejemplo, temperatura, velocidad del aire y humedad). La velocidad de secado no es una función del material por secar, pero sí, de las características de la transferencia de calor en la corriente de aire circundante (Smith, 2011).

Sin embargo, abajo del punto B en la Figura I.5 (que se conoce como el contenido de humedad crítica) la velocidad de secado disminuye en el período de velocidad decreciente (B-D). Dos zonas distintas pueden existir, aunque frecuentemente será posible distinguir solamente una. En el primer período de velocidad decreciente (B-C) la superficie del material no es capaz de suministrar suficiente humedad libre para saturar el aire. Ésto significa que la velocidad de secado es después influenciada por los mecanismos de transporte de humedad desde el interior de la masa del producto a la superficie. En el segundo período de velocidad decreciente (C-D) la superficie está completamente seca y el plano de separación, o interface del agua, se mueve en el sólido. La evaporación ahora sólo depende de la difusión del vapor a través del material y por lo tanto aumenta lentamente. Las fuerzas que controlan la difusión del vapor determinan la velocidad del secado y son independientes de las condiciones del aire en la superficie. Consecuentemente la naturaleza y estructura del material procesado influyen en la velocidad de secado (Smith, 2011).

El análisis de ésta etapa de secado es mucho más complejo y dos posibles mecanismos pueden considerarse para el transporte de la humedad hacia la superficie: el primero propone que fuerzas capilares pueden controlar el movimiento del agua en los espacios porosos entre las partículas en el interior de un sólido granular. Segundo, es más probable que la difusión del vapor de agua a través de la estructura porosa del material gobierne la velocidad de secado. La transferencia de masa a través de la fase sólida es muy lenta, particularmente a bajos contenidos de humedad, y dificulta predecirla debido a la incertidumbre en la determinación de las difusividades efectivas en la fase sólida (Smith, 2011).

La velocidad de secado durante el período de velocidad decreciente es causada por el gradiente de concentración de humedad dentro de la matriz del material. El movimiento de la humedad interna resulta de una serie de mecanismos, tales como la difusión de líquido, el flujo capilar, los flujos debido a los gradientes de encogimiento y presión (Lydersen, 1983).

Debido a la baja conductividad térmica de los materiales biológicos en el período de velocidad de secado decreciente, la transferencia de calor a las secciones internas de los materiales durante el calentamiento convencional es limitada. El interés de eliminar este problema, para evitar el deterioro de la calidad, así como para lograr el procesamiento térmico más rápido y eficaz ha dado lugar al aumento del uso de las microondas para el secado de alimentos (Bondaruk y colaboradores, 2007).

Con el fin de controlar y optimizar el proceso de secado, es necesario el uso de ecuaciones matemáticas para simular el fenómeno de transporte de humedad, en particular

de difusión y resistencia externa que son los mecanismos fundamentales que rigen la deshidratación del alimento (Giner, 2009; Kaya y colaboradores, 2007). Algunas ecuaciones empíricas (Tabla I.1) se utilizan para modelar la cinética de secado de alimentos que incluyen: Newton, Henderson-Pabis, Page modificada, logarítmica, exponencial de dos términos, Thompson, difusión aproximada, Wang-Singh, Henderson-Pabis modificada y otros (Akpınar y colaboradores, 2003; Togrul y Pehlivan, 2003; Simal y colaboradores, 2005; Doymaz y colaboradores, 2006). Aunque la mayoría de los modelos son empíricos, se derivan principalmente del modelo de difusión basado en la segunda ley de Fick para diferentes geometrías (Akpınar y colaboradores, 2003; Babalis y Belessiotis, 2004; Akpınar, 2006). En particular, el modelo estandarizado de Weibull puede ser aplicado en muchos sistemas biológicos, y fue encontrado valioso en el modelado de los fenómenos de deshidratación-rehidratación principalmente para diferenciar entre los procesos de difusión y resistencia externa (Marabi y colaboradores, 2003; Corzo y colaboradores, 2008).

Entre los trabajos realizados sobre la cinética se tienen los siguientes: Mowlah y colaboradores (1983), aplicaron la ley de difusión de Fick para predecir el comportamiento de secado de plátano (ya que ajustó bien el tiempo de secado predicho con los datos experimentales). Un modelo de transferencia de masa con un parámetro empírico para el secado de plátano fue propuesto por Mulet y colaboradores, (1989). En este modelo, una constante de secado fue utilizada como una función de las variables de proceso (temperatura, dimensión de las muestras, humedad). Este modelo se aplicó para el secado de cuatro frutas, manzana, pera, kiwi, y plátano. Wang y Chen (1998), utilizaron un modelo de difusión, en el cual los efectos de la transferencia de calor y masa fueron tomados en cuenta. Sus resultados mostraron que la transferencia de calor y masa más intensa se producen en la región de transición, donde el flujo capilar y la difusión del vapor juegan un papel importante. Un modelo de difusión variable fue propuesto por García (1988).

Tabla I.1. Modelos matemáticos aplicados a las curvas de secado.

| Número de modelo | Nombre del modelo | Modelo |
|------------------|---|--|
| 1 | Newton ¹ | $MR = \exp(-kt)$ |
| 2 | Page ¹ | $MR = \exp(-kt^n)$ |
| 3 | Page modificado ¹ | $MR = \exp(-(kt)^n)$ |
| 4 | Henderson and Pabis ¹ | $MR = a \exp(-kt)$ |
| 5 | Henderson and Pabis modificado ² | $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ |
| 6 | Logarítmica ¹ | $MR = a \exp(-kt) + c$ |
| 7 | Dos términos ¹ | $MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$ |
| 8 | Exponencial de dos términos ² | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$ |
| 9 | Midilli y colaboradores ¹ | $MR = a \exp(-kt^n) + bt$ |
| 10 | Wang y Singh ¹ | $MR = 1 + at + bt^2$ |
| 11 | Difusión aproximada ² | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$ |
| 12 | Verma ² | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$ |

¹ Duygu, 2011; ² Derya y Mehmet, 2010.

I.4. Microondas.

La radiación por microondas se utiliza ampliamente en hornos domésticos, en la comunicación por radio y radar. En muchos países, las personas están expuestas a esta radiación diariamente, y están a menudo preocupados por los posibles efectos negativos para su salud. Por otra parte, el alimento se somete a radiación de intensidad relativamente alta durante su preparación en un horno de microondas. (Shazman y colaboradores, 2007).

Las microondas (MW) se generan en un tubo a vacío de tipo magnetrón, son ondas electromagnéticas de longitudes de onda de unos cuantos milímetros hasta algunos centímetros y con frecuencias que van del rango de 300MHz a 300GHz. Dos frecuencias, 2450 ± 50 y 915 ± 13 Megahertz (MHz), son asignados por la Comisión Federal de Comunicaciones de los E.U. para aplicaciones de calentamiento por MW (Decareau, 1985; Metaxas y Meredith, 1983b). Dos mil cuatrocientos cincuenta MHz son ampliamente utilizados en hornos de MW domésticos y algunas aplicaciones industriales. Los sistemas de dos mil cuatrocientos cincuenta MHz tienen las limitaciones de profundidad de penetración que es pequeña (~1cm) y cavidades multimodo, causando patrones de calentamiento no uniforme e impredecible en envasados de alimentos. En general, las MWs a 915 MHz pueden penetrar más profundo (~3 cm) en los alimentos, y por lo tanto pueden proporcionar un calentamiento más uniforme (Mudgett, 1989). Los sistemas de novecientos quince MHz podrían establecerse con una cavidad de modo simple, que podría proporcionar un campo electromagnético predecible, lo que resulta en patrones de calentamiento predecibles y reproducibles en los alimentos.

La energía electromagnética es absorbida por el agua, penetrando directamente en el material y calentándolo volumétricamente (del interior hacia la superficie). La rápida absorción de energía por las moléculas de agua provoca una rápida evaporación de ella, creando un flujo hacia el exterior eliminándola en forma de vapor. (Khraisheh y colaboradores, 1997a; Prabhanjan y colaboradores, 1995). Además de mejorar la velocidad de secado, este flujo hacia el exterior ayuda a prevenir el encogimiento de la estructura del tejido, que prevalece en la mayoría de las técnicas convencionales de secado con aire. Por lo tanto, mejores características de rehidratación se pueden esperar en un secado con microondas (Khraisheh y colaboradores, 1997b; Prabhanjan y colaboradores, 1995).

El campo de microondas cambia de dirección millones de veces por segundo en el horno de microondas. La conversión de la energía de microonda en calor se explica básicamente por dos fenómenos:

- Moléculas, con un momento dipolar permanente, giran en un campo eléctrico que cambia rápidamente. Cuando las moléculas giran en un campo que cambia su polaridad a una frecuencia de millones de veces por segundo, se desprende calor debido a las fuerzas de fricción entre las moléculas.
- La carga derivada por la acción del campo (conducción iónica). Cuando los iones que se derivan, debido al campo eléctrico, chocan con otras moléculas como una bola de billar y el calor es desprendido debido a la fricción.

Las moléculas del agua son polares, es decir, el centro de carga se desplaza. Esto significa que puede girar bajo la influencia de un campo eléctrico alterno. Todos los productos alimenticios normalmente contienen de 50-97% de agua, en el caso de la fresa contiene alrededor de 90%. Así, el material es adecuado para el calentamiento y el secado con energía de microondas. En el secado con aire caliente, la superficie del producto se seca primero y esta capa seca es una mala conductora de calor durante el proceso de deshidratación. Las microondas, sin embargo, son capaces de penetrar una capa superficial seca y calentar el material en todas las regiones de alta humedad. Esto promueve el transporte de masa y aumenta la velocidad de secado.

Las microondas se han utilizado como una fuente de calor desde la década de los 1940's (Mermelstein, 1997). Desde la década de los 1960's hasta la actualidad ha habido un gran interés en el procesamiento por microondas de los materiales poliméricos en todo el mundo. Esto dio lugar a aplicaciones industriales exitosas en la industria del caucho, en las propiedades de adhesivos (Prasad y colaboradores, 1998), en la química de polímeros (Hernández y González, 2002), en la recuperación de fibra de carbono (Lester y colaboradores, 2004) y otros.

En los últimos años, el rápido desarrollo de equipos de microondas y la modificación de los hornos han sido constantes. Se puede observar un incremento en el número de artículos y patentes, en las áreas de ciencia de los materiales (Hasna, 2003), tecnología de alimentos (Data y Anantheswaran, 2001), tecnología medioambiental (Van Loock, 1997), síntesis orgánica (Loupy, 2002), síntesis de polímeros (Zong y colaboradores, 2003), etc. Hoy en día, la microonda es una tecnología que aporta mejoras en el rendimiento de dispositivos complejos, junto con una reducción en el tamaño y el costo de la producción.

Las microondas calientan el material volumétricamente y más rápidamente que el calentamiento convencional. La velocidad de calentamiento durante el calentamiento convencional es más pequeña ya que no hay generación de calor volumétrico en el interior del material como un flux de calor radiante ya que la flama calienta el material durante dicho proceso convencional. El amplio uso de las microondas en la industria alimenticia se debe a la reducción de tiempos y costos de procesamiento, el aumento de la uniformidad y el rendimiento de los productos, a la mejora de la micro-estructura única y protección del material al oscurecimiento de la superficie y de la corteza (Aciemo y colaboradores, 2004; Badeka y colaboradores, 1999; Gunasekaran y colaboradores, 2005; Litvin y colaboradores, 1998).

El fenómeno físico básico que es responsable del calentamiento de materiales alimenticios a frecuencias de microondas es la rotación dipolar (Schiffmann, 1995). El mecanismo de rotación dipolar se basa en el hecho de que las moléculas de agua están sometidas a un campo de microondas que rápidamente cambia de dirección, los dipolos tratan de alinearse con la dirección del campo eléctrico. El campo eléctrico proporciona la energía para que las moléculas de agua giren y permanezcan alineadas. La energía se convierte en energía cinética de las moléculas de agua y luego en calor, cuando las moléculas de agua se realinean y el campo eléctrico cambia, esto hace que las moléculas circundantes interactúen produciendo la fricción (Khraisheh y colaboradores, 1997b). Por otra parte, los patrones de absorción de potencia en un material calentado en un horno de

microondas dependen del horno y los factores de carga, de acuerdo con estos patrones de calentamiento una fuente de calor volumétrica es disipada a través del material debido a las pérdidas dieléctricas, así como el efecto conductivo directo. Después, el propio proceso se rige esencialmente por dos mecanismos: la transferencia de calor y masa.

Las distribuciones de temperatura y humedad en un material durante el calentamiento por microondas se ven influidas por la interacción y la absorción de la radiación por el medio y los procesos de transporte que lo acompañan debido a la disipación de la energía eléctrica en calor (Metaxas y Meredith, 1983b). Los factores que determinan cómo un material se calentará cuando se somete a radiación por microondas incluyen: la geometría de la cavidad en la que se lleva a cabo el calentamiento (Saltiel y Datta, 1999), la geometría y el tamaño del material (Chamchong y Datta, 1999) y sus parámetros electromagnéticos y térmicos (Chamchong y Datta, 1999; Metaxas y Meredith, 1983a).

I.5. Propiedades dieléctricas.

La interacción entre la radiación por radiofrecuencia (RF) ó MW y el material a calentar es principalmente una función de las propiedades dieléctricas (es decir, constante dieléctrica (ϵ') y factor de pérdida dieléctrica (ϵ'')). La ϵ' determina la cantidad de energía reflejada desde el producto y se transmite en el producto, mientras que el ϵ'' está relacionado con qué tan bien un material absorbe la energía de los campos eléctricos que pasan a través de él y lo bien que convierte esa energía en calor (Ohlsson y colaboradores, 1974). La profundidad de penetración (d_p) de la radiación por MW ó por RF se puede derivar de la ϵ' y es una medida de la distancia en el producto en la cual la potencia disminuye un 37% de ella en la superficie. La composición de los alimentos afecta su interacción con la radiación electromagnética por MW y por RF, y por lo tanto, el calor generado dentro del alimento en el calentamiento (Grimwood, 1989; Singh y Heldman, 1993). La composición también afecta a las propiedades térmicas de los alimentos tales como la conductividad térmica (k) y calor específico (c) (Lyng y colaboradores, 2002). Por lo tanto un buen conocimiento de las propiedades térmicas y el dieléctrico es esencial para el diseño de equipos de RF y de MW para el procesamiento de alimentos y también para la comprensión de la interacción entre productos de diferente formulación y radiación electromagnética.

La interacción entre la energía dieléctrica y los productos alimenticios en intervalos seleccionados de frecuencia, proporciona una mejor comprensión perteneciente al procesamiento, ya sea calentamiento por MW ó por RF. Estas propiedades de los alimentos son importantes en el diseño del equipo de procesamiento por RF y MW y en la formulación de alimentos y comidas destinadas al uso de hornos de MW (Mudgett, 1995). El uso de energía de MW para el calentamiento dieléctrico de alimentos es un área de aplicación importante y requiere información sobre las propiedades dieléctricas para una operación eficiente (Nelson, 1994). Datos sobre las propiedades dieléctricas de varios alimentos se han reportado en la literatura (Ahmed y colaboradores, 2007; Al-Holy y colaboradores, 2005; Everard y colaboradores, 2006; García y colaboradores, 2001; Guan y colaboradores, 2004; Nelson, 1994; Zheng y colaboradores, 1998) y están disponibles en varias bases de datos.

Las propiedades dieléctricas de un material alimenticio varían dependiendo de varios factores, entre ellos la frecuencia MW/RF, la naturaleza iónica, contenido de humedad, temperatura, concentración, naturaleza y componentes de los materiales alimenticios. El cambio en las propiedades dieléctricas con la temperatura depende del contenido de agua ligada y libre de los materiales alimenticios (Calay y colaboradores, 1995). El contenido de agua y sal, la frecuencia, y la temperatura se incluyen comúnmente en los estudios dieléctricos y las ecuaciones predictivas (Calay y colaboradores, 1995).

Las propiedades dieléctricas de un material describen el nivel de interacción con el campo electromagnético y por lo tanto, la determinación de su magnitud es esencial para la comprensión adecuada de los patrones de calentamiento que se producen durante el calentamiento por microondas y en última instancia, para el diseño de un proceso por microondas (Venkatesh y Raghavan, 2004). El conocimiento de la relación entre frecuencia y propiedades dieléctricas es útil en la determinación del intervalo de frecuencia óptima en el

cual el material en cuestión tiene las características dieléctricas deseadas para aplicaciones previstas (Wang y colaboradores, 2006).

Los contenidos de humedad, grasa, proteína, carbohidratos y ceniza pueden afectar a las propiedades dieléctricas y térmicas, aunque en general se acepta que la humedad, grasa y ceniza son los macronutrientes que ejercen la influencia más consistente en las propiedades dieléctricas (que se resumen en la Tabla I.2), con las proteínas y carbohidratos teniendo dieléctricamente actividad o estados inertes. (Zhang y colaboradores, 2007).

Cuando un material dieléctrico se coloca en un campo eléctrico o electromagnético, el material se polariza, y almacena la energía eléctrica a través de la polarización. El nivel y el mecanismo de polarización disponibles del material depende del estado y la composición de él, y la frecuencia del campo eléctrico aplicado (Adu y colaboradores, 1995). Las microondas no se presentan en forma de calor, sino más bien como energía que son manifestadas en forma de calor a través de su interacción con los materiales. Es como si causaran en los materiales calentamiento por sí mismos. Hay muchos mecanismos para esta conversión de energía donde el mecanismo más importante es la rotación dipolar (Schiffmann, 1995). El mecanismo de rotación dipolar se basa en el hecho de que las moléculas de agua tienen cargas positivas y negativas, llamadas dipolos. Los dipolos están influenciados por el cambio rápido de la polaridad del campo eléctrico. Aunque están normalmente orientadas al azar, el campo eléctrico intenta alinearlas. Sin embargo, cuando el campo decae a cero (se relaja), los dipolos vuelven a su orientación al azar, sólo para ser alineados de nuevo cuando el campo eléctrico cambia a su polaridad opuesta.

Tabla I.2. Una selección de propiedades dieléctricas publicadas muestran la influencia del contenido de humedad (MC), sal/cenizas (SA), grasa/lípidos (FL) en las propiedades dieléctricas.

| | Autor y año | Frecuencia (MHz) | Producto | Comentario |
|----------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------------|--|
| Contenido de humedad | Van Dyke y colaboradores (1969) | 915 | Carne molida | El e" independiente del MC<20% y MC>45%, pero con un incremento lineal entre 20% y 45% del MC. |
| | Bengtsson y Risman (1971) | 2800 | Carne | Una correlación positiva muy fuerte entre la e' y MC, sin embargo no tanto con el e". |
| | Roebuck y Goldblitch (1972) | 1000, 3000 | Solución Azúcar/Almidón | La e' incrementa con el MC mientras que el e" cambia con la adición de azúcar y almidón. |
| | Padua (1993) | 2470 | Soluciones de azúcar | El agua ligada químicamente ejerce menor influencia sobre las propiedades dieléctricas contra el agua no ligada. |
| | Lyng y colaboradores (2002) | 2430 | Hamburguesas | Adicionando 15% de agua no hubo efecto en la e' y el e", a porcentajes mayores el freído duró menos. |
| | Lyng y colaboradores (2005) | 27.12 y 2450 | Carne y soluciones acuosas | Un 25% de agua ligeramente incremento tanto la e' como el e" en mezclas de carnes. |
| Sal o ceniza | Hasted y colaboradores (1948) | 3000, 10000 | Soluciones de NaCl | Adicionando sal puede decrecer la e'. |
| | Van Dyke y colaboradores (1969) | 915 | Carne, cerdo | 4% de sal aumenta más del doble en el e" y 1% decrece el e" en 20% |
| | Bengtsson y Risman (1971) | 2800 | Salsas | Adicionando 1% de sal a la salsa incrementa el e" cerca del 20%, pero también incrementa la e' ligeramente. |
| | Li y Barringer (1997) | 2450 | Jamón | El contenido de sal (0.5 - 3.5%) incrementa el e" mientras que mantiene constante a la e'. |
| | Piyasena y Dussault (1999) | 30, 100 | Solución de goma Guar al 0.27% | La concentración de sal (0.2-0.7%) no fue significativa contra el e" mientras que con la e' pudo ser reducida. |
| | Lyng y colaboradores (2002) | 2430 | Hamburguesas | 3% de sal redujo la e' e incrementó el e" |
| | Lyng y colaboradores (2005) | 27.12 y 2450 | Carne y soluciones acuosas | La sal redujo la e' e incrementó el e" notablemente a 5% y 27.12 MHz en soluciones acuosas. |
| Grasa / Lípidos | Ohlsson y colaboradores (1974) | 900 | Emulsiones de carne modelo | El e" decrece con el incremento de grasa donde la velocidad fue más rápida entre 15-35% contra 0-15% de grasa. |
| | Mudgett y colaboradores (1997) | 300-3000 | Emulsiones de carne | El contenido de lípidos de alimentos redujo la actividad dieléctrica como una exclusión de volumen. |
| | Ryynänen (1995) | 0.01-100 | Manteca, aceite de maíz | La e' y el e" de grasas son lentas y varían ligeramente con la fuente. |
| | Lyng y colaboradores (2002) | 2430 | Hamburguesas | 10% de grasa reduce la e' y el e". |
| | Lyng y colaboradores (2005) | 27.12 y 2450 | Grasa de cerdo y carne | 20% de grasa reduce la e' y el e" en ambas frecuencias. |

e' = Constante dieléctrica

e" = Factor de pérdida dieléctrica

MC = contenido de humedad

I.6. Secado con microondas.

En los últimos años, el secado por microondas ha ganado popularidad como un método de secado alternativo en la industria alimenticia. (Zheng-Wei y colaboradores, 2004).

En el procesamiento por microondas, la energía se transfiere directamente a la muestra produciendo un calentamiento volumétrico. La energía de microondas es suministrada a un nivel molecular, a través de la interacción molecular con el campo electromagnético, en particular, a través de la fricción molecular resultante de la rotación dipolar de los solventes polares y de la migración conductiva de iones disueltos (Oliveira y França, 2002). La rotación dipolar es causada por la variación de campos eléctricos y magnéticos en el producto (Alton, 1998). Esta característica es fundamental, ya que el agua, el principal constituyente del alimento, tiene una naturaleza dipolar. (Romano y colaboradores, 1995), aumentando así, la temperatura del producto para evaporar el agua contenida y secarlo. En este proceso, la fuerza del campo electromagnético, el volumen, masa, contenido de humedad y las propiedades del producto son los factores más importantes que pueden determinar los parámetros de secado. Sólo cuando el nivel de potencia de microondas es bien modulado con los factores que influyen en el producto en todo el proceso de secado, los efectos deseados del secado se pueden alcanzar de manera eficiente. Un nivel de potencia bajo de microondas puede conducir a una baja temperatura y una velocidad lenta de secado, mientras que un nivel alto de potencia puede conducir a una alta temperatura indeseable, puede aumentar la distribución desigual de la energía de microondas, y con ello dañar la calidad del producto (Li y colaboradores, 2010a).

En un horno de microondas típico, el magnetron que genera las microondas, que está fuera de la cavidad del horno, es enfriado usando aire forzado externo. En los hornos de microondas sin una disposición de aire caliente, una parte de este aire forzado externo que fluye sobre el magnetron desde el interior del horno de microondas a través de pequeños orificios en las paredes del horno, resulta en un flujo de aire de baja velocidad en el interior de él. Este flujo de aire es principalmente para reducir la condensación del agua en el interior del horno. Sin embargo, ya que este flujo de aire afecta a la transferencia de calor y humedad de la superficie del alimento, el objetivo es obtener una comprensión cuantitativa de su efecto (Verboven y colaboradores, 2003).

Por lo tanto, el secado por microondas ofrece ahorro significativo de energía, con una reducción potencial en los tiempos de secado de hasta el 50% del material tratado (McLoughlin y colaboradores, 2003).

Mudgett (1989), reportó que las características del calentamiento por microondas de productos alimenticios pueden variar considerablemente con la frecuencia del procesamiento, la temperatura, la composición química y el estado físico del producto. Cunningham y colaboradores (2008a, b) y Khraished y colaboradores (2004) estudiaron el efecto de microondas en la muestra de alimento amiláceo y llegaron a la conclusión de que las muestras secadas con microondas conservan más nutrientes (vitaminas y proteínas) y tienen mejor rehidratación que la muestra secada por convección. Yang y Gunasekaran (2001), Gunasekaran y Yang (2007a, b) han hecho una cantidad significativa de estudios

experimentales en el calentamiento pulsado con microondas y reportaron que este calentamiento debería preferirse sobre el calentamiento con microondas continuo cuando uniformemente la temperatura en el interior de la muestra sea crítica.

El calentamiento con microondas ha sido utilizado con éxito en la industria alimentaria, incluyendo templado o descongelamiento de los alimentos congelados a granel (carne, pescado, y otros), cocimiento de tocino y salchichas, y el secado de pasta y verduras (Bengtsson y Ohlsson, 1974; Hulls y Shute, 1981; Hulls, 1982; Jones, 1992; Schiffmann, 1992). La investigación sobre el tratamiento con microondas de alimentos también se ha reportado para la desinfección de insectos en productos agrícolas (Wang y colaboradores, 2003), escaldado de vegetales, inactivación de enzimas, pasteurización de panes, jamones curados y emulsiones de salchicha, esterilización de productos alimenticios (Decareau, 1985; Venkatesh y Raghavan, 2004).

En el secado pulsado (encendido/apagado) con microondas, las ondas electromagnéticas interactúan directamente con partículas iónicas y moléculas dipolares, causando excitación y fricción entre ellas, generando calor y el aumento de temperatura rápidamente (Buffler, 1993). Cuando la potencia del horno de microondas es apagada, estas actividades se paran totalmente y la temperatura cae inmediatamente. Estas características distinguen al secado con microondas de los otros métodos de secado convencional, donde el calor es por lo general transportado desde la superficie al centro y la temperatura aumenta y disminuye lentamente (Feng y colaboradores, 2001). Por lo tanto, un control rápido de temperatura es posible sólo en el secado con microondas si la potencia puede ser controlada adecuadamente e instantáneamente durante el proceso.

Con la generación interna de calor el mecanismo de transferencia de masa es principalmente a través de un gradiente total de presión establecido debido a la rápida generación de vapor en el interior de la muestra. La mayor parte de la humedad se vaporiza antes de salir de la muestra. Sin embargo, cuando la muestra está inicialmente muy húmeda la presión dentro de la muestra se eleva rápidamente, el líquido puede ser eliminado de la muestra bajo la influencia de los gradientes de presión interna (Lyins y Hatcher, 1972).

La tornamesa es una adición al horno de microondas que funciona universalmente para aumentar la uniformidad de la temperatura. Cuando el material gira, diferentes ubicaciones del alimento pasan por diferentes intensidades del campo. Aunque el desarrollo a partir de razonamiento intuitivo y no intuitivo de una comprensión científica básica del proceso, la tornamesa sigue siendo el método más popular para aumentar la uniformidad del calentamiento del alimento. A pesar de su popularidad, no ha habido ningún estudio previo que se ocupe del modelaje de calentamiento del alimento en un horno de microondas con una tornamesa (Geedipalli y colaboradores, 2007).

Yang y Gunasekaran (2001, 2004) han propuesto modelos para la predicción de la distribución de temperatura (TD) en el interior de la muestra durante el calentamiento pulsado con microondas basado en la ley de Lambert y las ecuaciones de Maxwell. La desigualdad de la TD obtenida durante el calentamiento continuo con microondas se redujo drásticamente cuando el calentamiento pulsado con microondas fue usado. Sin embargo, el efecto de la dimensión de la muestra y nivel de potencia de las microondas no fueron investigados.

Zhang y colaboradores (2006), han revisado investigaciones recientes sobre secado con microondas, centrándose principalmente en frutas y verduras. Estos autores sugieren que todavía hay una falta de análisis teórico, modelado y simulación en el área de procesos de secado con microondas. El modelaje matemático puede desempeñar un papel importante en el diseño y control de los parámetros del proceso durante el secado, y la realización de simulaciones usando modelos cinéticos apropiados puede contribuir a la optimización del proceso (Khraisheh y colaboradores, 2000). Los modelados validados del proceso para experimentos deberían predecir la influencia de los parámetros más relevantes en el tiempo de secado, y ayudar a mejorar la eficiencia energética de diferentes combinaciones de los procesos de secado (Zhang y colaboradores, 2006).

I.7. Cinética de secado con microondas.

El modelado de calentamiento por microondas ha logrado avances significativos en los últimos años (Chen y colaboradores, 1993; Khraisheh y colaboradores, 1997a; Lin y colaboradores, 1995, Oliveira y França, 2003; Yang y Gunasekaran, 2001). Ésto implica el acoplamiento de los modelos para la potencia de absorción de microondas y la TD en el interior del material. El modelado de secado con microondas también ha tenido algunos progresos en los últimos años (Doland y Datta, 1993; Jansen y Van der Wekken, 1991; Lefeuvre, 1981; Lu y colaboradores, 1998; Lu y colaboradores, 1999; Ofoli y Komolprasert, 1988; Turner, 1994), en el que los modelos desarrollados van desde el complicado calor acoplado, masa y ecuaciones de onda para los modelos empíricos que expresan la transferencia de masa a través de parámetros de la naturaleza fenomenológica que incorporan la mayoría de los parámetros de proceso que afectan al secado con microondas, tales como la potencia de microondas y vacío. Sin embargo, es poca la literatura que se centra en el modelado del calentamiento con microondas a vacío o secado. Lian y colaboradores, (1997) describen el calor acoplado y la transferencia de la humedad durante el secado a vacío con microondas. Los modelos desarrollados toman en cuenta la transferencia de humedad como una combinación simultánea de transferencia de agua (líquida) y de vapor. Kiranoudis y colaboradores, (1997) estudiaron el modelo matemático de la cinética de secado con microondas a vacío de algunas frutas. Se utilizó un modelo empírico de transferencia de masa, involucrando un parámetro básico de la naturaleza fenomenológica, y la influencia de las variables de proceso fue examinada por la incorporación de una constante al modelo. Desafortunadamente Kiranoudis y colaboradores, (1997) sólo secaron los materiales sin voltearlos, dando lugar a un calentamiento no uniforme. Además, el proceso de secado con microondas a vacío en etapas posteriores al secado no ha sido bien investigado.

Los modelos matemáticos de calentamiento con microondas también se han desarrollado para los procesos complejos que tengan en cuenta fenómenos tales como el cambio de fase (descongelación y evaporación) y cambios de las propiedades del material que se producen con respecto a la temperatura. El calentamiento con microondas y los modelos por transporte fueron ampliamente estudiados para descongelar y calentar sistemas multifásicos en investigaciones (Basak y Ayappa, 1997, 2001, 2002; Chamchong y Datta, 1999; Basak, 2003, 2004; Lee y Marchant, 2004) y se observaron algunos efectos de calentamiento interesantes contrarios a la intuición que conducen a mayores velocidades en el procesamiento de materiales.

El padrón de cinética tradicional observado durante el secado con aire cambia drásticamente cuando se aplican microondas. Varios modelos de transferencia de calor y masa se han usado durante los procesos de secado combinado microondas-aire. Pero la mayoría de los modelos son difíciles de aplicar (Khraisheh y colaboradores, 2000; McMin y colaboradores, 2003; Andrés y colaboradores, 2004) lo que limita su aplicación práctica bajo diferentes condiciones de secado.

I.8. Atributos de calidad.

Las frutas deshidratadas tienen un mercado de rápido crecimiento y los consumidores son más exigentes para productos secos de mayor calidad. (Uribe y colaboradores, 2011).

Además del modelado, la operación de secado se debe optimizar para obtener productos de calidad. En lo que respecta a la calidad, el color es una propiedad clave que rige la aceptabilidad inicial de cualquier alimento, y las propiedades mecánicas son de gran interés en la caracterización de la primera mordida. El secado conduce inevitablemente a cambios de color en los alimentos. Normalmente, cuanto mayor es la intensidad del tratamiento, mayor es el cambio de color. Las condiciones del proceso influyen también las apariencias externas e internas de un producto seco (Maskan, 2001). Hasta la fecha, no hay información publicada sobre el efecto que la aplicación de microondas, tiene en los cambios de color que ocurren en manzana o fresa durante el secado. Al mismo tiempo, también no se dispone de información sobre el impacto de la aplicación de microondas sobre los cambios estructurales y las propiedades mecánicas de estas frutas. En general, los cambios estructurales que se producen durante el secado están relacionados con factores tales como el encogimiento celular, la solubilización de pectina, etc. (Prothon y colaboradores 2001; Raghavan y Silveira, 2001; Khraisheh y colaboradores 2004; Aguilera y colaboradores 2003; Contreras y colaboradores 2005, 2007). Estos factores son conocidos por que se comportan de manera diferente cuando las microondas se aplican durante el secado con aire caliente.

El color se ha medido en la industria alimentaria por inspección visual subjetiva, incluyendo el uso de estándares visuales de color. El colorímetro Tristimulus ha sido ampliamente aceptado como un método instrumental rápido y simple para la medición de la percepción visual de los productos alimenticios (Hayakawa, 1977; Clydesdale, 1978; Gnanasekharan y colaboradores, 1992; Loughrey, 2000; Ozkan y colaboradores, 2002; Ahmed y colaboradores, 2002; Dermesonlouoglou y colaboradores, 2007).

El conocimiento preciso de los parámetros cinéticos, la velocidad constante de degradación y la energía de activación son esenciales para predecir cuantitativamente los cambios de calidad que ocurren durante el procesamiento térmico. La optimización del proceso térmico se basa en los modelos cinéticos de degradación apropiados para seguridad y calidad. Numerosos investigadores han evaluado la cinética de degradación de pigmentos y color en frutas y vegetales (Weemaes y colaboradores, 1999; Ávila y Silva, 1999; Steet y Tong, 1996; Ryan Stoneham y Tong, 2000; Canjura y colaboradores, 1991; Schwartz y Von Elbe, 1983; Gupte y colaboradores, 1963; Nisha y colaboradores, 2004) durante el tratamiento térmico es una cinética de reacción de primer orden. Se ha reportado que durante el almacenamiento a diferentes temperaturas la degradación del color y de compuestos bioactivos de mermelada de fresa siguieron una cinética de primer orden (Patras y colaboradores, 2009).

Durante el procesamiento con microondas, la calidad del alimento es una de las preocupaciones más importantes de los consumidores. El secado con microondas de los productos alimenticios da lugar a conversiones y reacciones químicas complicadas. Tales reacciones pueden provocar la degradación de vitaminas, la oxidación de lípidos y las

reacciones de oscurecimiento, con los mecanismos siendo influenciados por factores tales como concentración, temperatura y actividad de agua (a_w) (Bruin y Luyben, 1980). Varios trabajos de investigación han estudiado pérdidas de vitaminas durante la cocción con microondas. Rosen (1972) reportó el efecto de las microondas en alimentos y materiales relacionados. La energía cuántica de las microondas, en contraste con algunos otros tipos de radiación electromagnética (rayos X y γ), fue reportada como baja, en varios órdenes de magnitud, sin causar cambios químicos por la interacción directa con las moléculas y enlaces químicos. Gerster (1989) utilizó el calor sensible y las vitaminas solubles en agua, C, B1 y B2 como nutrientes indicadores de los cambios cualitativos. La retención de vitaminas durante el escaldado (blanqueo ó blanqueado), cocción y recalentamiento de los alimentos en un horno de microondas es comparable a la retención utilizando métodos convencionales de calentamiento.

Un secado por microondas de fruta a una temperatura constante por lo general sigue una curva típica de secado. En la etapa intermedia de secado, la humedad se elimina rápidamente, se pierde gran cantidad de aroma, y la carbonización se produce con frecuencia (Li y colaboradores, 2009; Li y colaboradores, 2010b). También, la “expansión” por lo general ocurre en esta etapa, causando daño a la calidad y cambios no deseados en la textura del alimento (Zhang y colaboradores, 2006).

Hay varios problemas de calidad en los productos horneados con microondas. Estos son la textura firme y dura, de bajo volumen, falta de color y formación de costras, alta pérdida de humedad y rancidez rápida (Sumnu, 2001). Martin y Tsen (1981), reportaron diferencias en la estructura celular entre los pasteles horneados por microondas y convencionalmente.

También se han reportados los efectos de las condiciones y métodos de secado en la calidad del producto final. Krokida y Maroulis (1999), examinaron el efecto de las microondas y microondas a vacío sobre el aumento de los cambios de la porosidad y color del producto. Ellos mostraron que el secado con microondas aumenta la elasticidad y disminuye la viscosidad del producto.

El calentamiento por microondas produce distribuciones de humedad que son complejas y fundamentalmente diferentes del calentamiento convectivo. La pérdida de humedad se produce a través del flujo por evaporación, difusión y presión (donde la dinámica del flujo/calor permite que la presión interna producida se acumule) y afecta directamente la calidad del alimento. El calentamiento no uniforme, por ejemplo, en los bordes, aumentará la pérdida de humedad, así como dando lugar a la pérdida de nutrientes y degradación del sabor (Ni y colaboradores, 1999).

El secado con microondas ofrece varias ventajas distintas, incluyendo el aumento de rendimiento y una mayor eficiencia energética, pero su intensidad (profundidad de penetración) depende de las propiedades físicas y dieléctricas del alimento tratado y puede variar con la temperatura (Venkatesh y Ragavan, 2004), la frecuencia del campo electromagnético, así como con la composición del alimento y su forma general (Marra y colaboradores, 2009). El calentamiento por microondas es reconocido como un tratamiento rápido, sin embargo, se caracteriza por una cierta no uniformidad en la distribución de la temperatura.

II. Materiales y Métodos.

II.1. Materia Prima.

Para la realización del estudio se utilizó fresa (*Fragaria vesca*) con el mismo grado de madurez, comprada en un mercado de la ciudad de México. Las etapas del proceso se muestran en la Figura II.1.

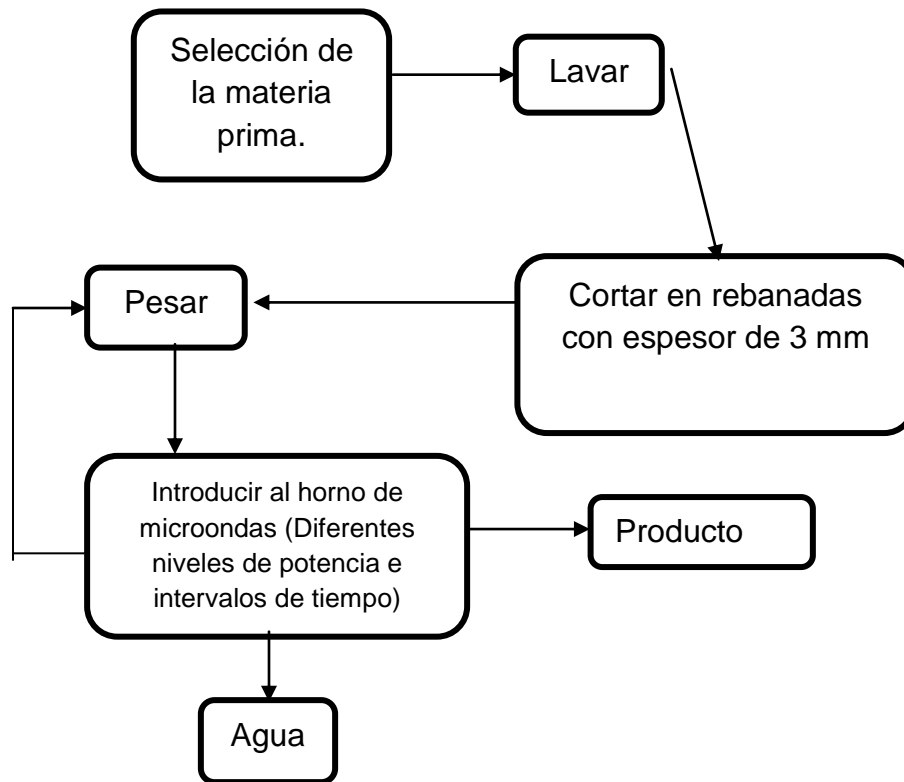


Figura II.1 Diagrama de bloques del proceso.

II.2. Métodos.

2.2.1. Determinación de Humedad Inicial y Final

Esta determinación fue hecha en la muestra, antes y después del proceso de secado en una termobalanza hasta obtener un peso constante.

2.2.2. Determinación de Sólidos totales

Esta determinación se realiza por medio de la siguiente diferencia:

Sólidos totales = masa de la muestra – masa de agua contenida en la muestra.

2.2.3. Equipo.

El horno de microondas doméstico es de la marca Daewoo modelo KOR-6L7B sin modificaciones, en la Tabla II.1 se muestran sus características técnicas:

Tabla II.1. Características del horno de microondas utilizado.

| | |
|---|-----------------------|
| Fuente de alimentación | 120 V – 60 Hz |
| Consumo de potencia | 1100 W |
| Potencia de salida | 700 W |
| Frecuencia | 2450 MHz |
| Dimensiones (AN x AL x PX) en pulgadas | 17.6 x 10.6 x 12.6 |
| Dim. Internas (AN x AL x PX) en pulgadas | 11.6 x 8.3 x 11.9 |
| Capacidad efectiva del horno | 0.7 Ft ³ . |

Fuente: Fabricante

III. Experimentación.

III.1. Procedimiento experimental

- 1) Lavar, secar y pesar las cajas de Petri vacías registrando el peso de cada una de ellas.
- 2) Colocar las rebanadas de fresa en las cajas de Petri y registrar el peso (peso inicial), de cada una de ellas.
- 3) Se introducen las cajas de Petri con las rebanadas de fresa en el horno de microondas para el inicio de la operación de secado.
- 4) Seleccionar el nivel de potencia de cada experimento.
- 5) Seleccionar el intervalo de tiempo.
- 6) Poner a funcionar el horno.
- 7) Después de transcurrido el lapso de tiempo, pesar cada una de las cajas de Petri y anotar su respectivo peso. Esta operación se realiza hasta obtener un peso constante, sin que se queme o caramelicen los azúcares presentes en la fresa.

IV. Análisis de resultados.

IV.1. Análisis de los resultados de los experimentos de secado.

Se realizaron 17 experimentos con intervalos de tiempo entre 10 y 50 s y el nivel de potencia entre 30 % y 80 %, y un espesor de la rebanada de 3 mm. Los mejores resultados se presentan en la Tabla IV.1 en la cual se tiene el número de experimento, la ecuación generada obtenida con el programa Origin versión 8, el coeficiente de correlación (R^2) y el porcentaje de humedad.

Tabla IV.1. Número de experimento, ecuación generada, coeficiente de correlación (R^2) y porcentaje de humedad.

| No. de experimento | Ecuación generada (Curva ajustada) | Coefficiente de correlación (R^2) | Porcentaje de humedad |
|--------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 2 | $Y = 14.58365 \cdot \exp(-x/995.39521) - 3.1978$ | 0.9913 | 6.75 |
| 9 | $Y = 16.22032 \cdot \exp(-x/1123.37928) - 4.67875$ | 0.9877 | 0.91 |
| 12 | $Y = 15.23549 \cdot \exp(-x/701.40726) - 3.61056$ | 0.9824 | 1.78 |

En las Figuras IV.1, IV.2 y IV.3 se observan las curvas de cinética de secado las cuales tienen el comportamiento característico en el proceso de secado de materiales biológicos y no biológicos.

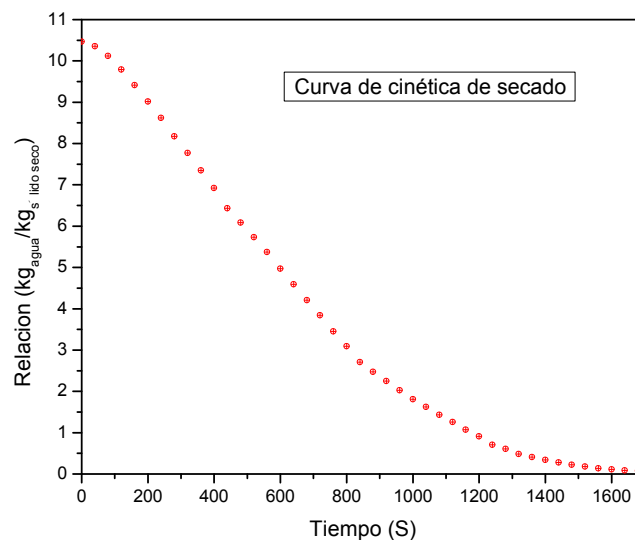


Figura IV.1. Curva de cinética de secado del experimento 2.

El experimento 2 se realizó con un nivel de potencia del 30 % y un intervalo de 40 s, obteniéndose una humedad final en el producto del 6.75 %, la cual es característica de un producto seco.

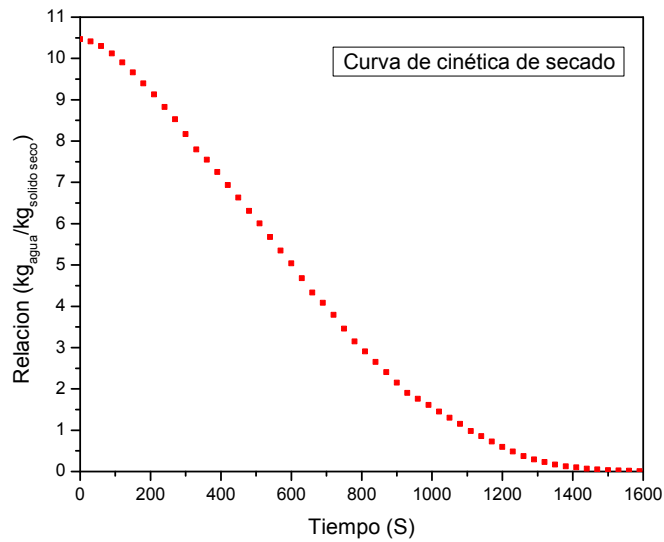


Figura IV.2. Curva de cinética de secado del experimento 9.

Para el experimento 9, se utilizó un nivel de potencia del 50 % y un intervalo de 30 s, obteniéndose una humedad final en el producto del 0.91 %, debido a las condiciones empleadas en la experimentación.

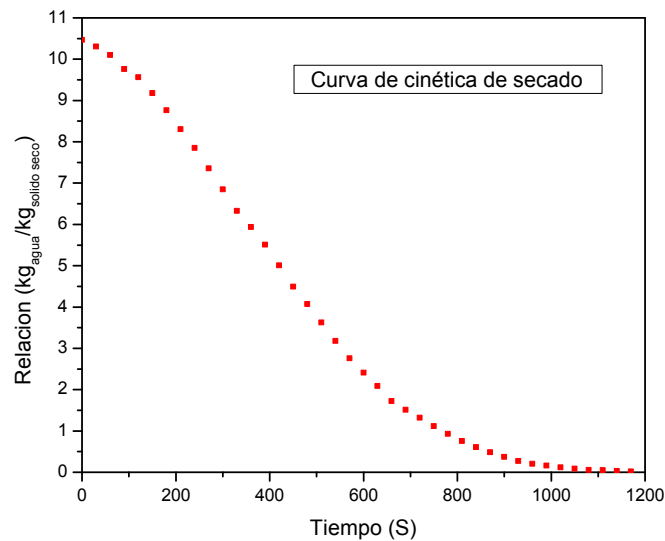


Figura IV.3. Curva de cinética de secado del experimento 12.

Siguiendo con el experimento 12, el horno se manipuló a un nivel de potencia del 60 % y un intervalo de 30 s, obteniéndose una humedad final en el producto del 1.78 %, la cual es característica de un producto seco.

En las Figuras IV.4, IV.5 y IV.6 se muestran las curvas ajustadas de la cinética de secado de cada uno de los experimentos mencionados en la Tabla IV.1.

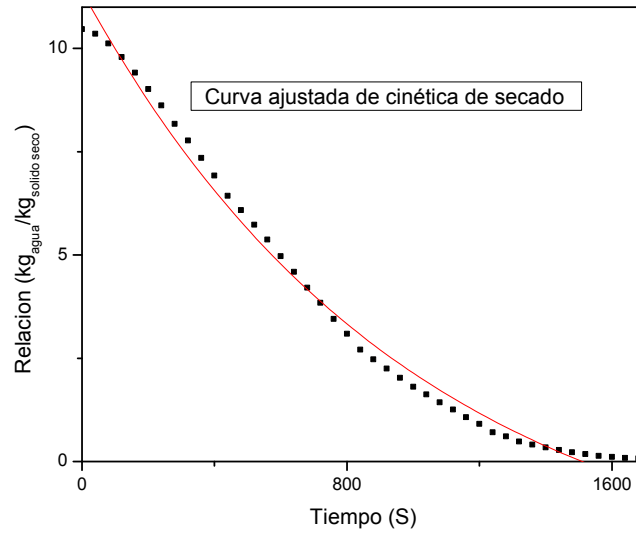


Figura IV.4. Curva ajustada de cinética de secado del experimento 2.

En la figura IV.4 se observa un buen ajuste de la curva de cinética de secado obteniéndose un coeficiente de correlación (R^2) de 0.9913.

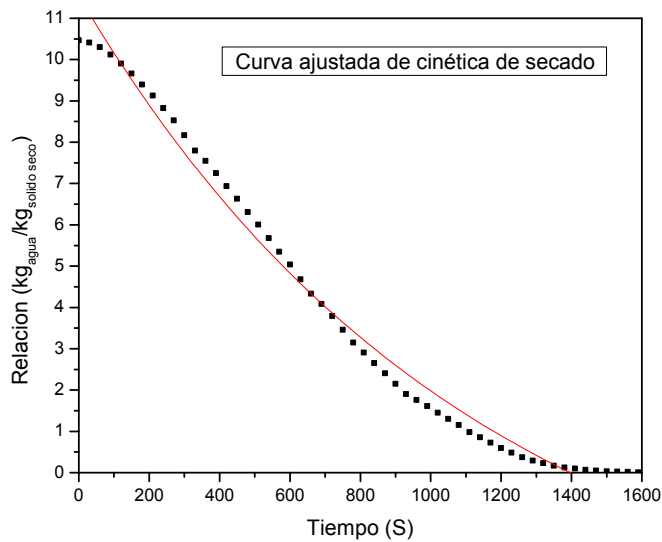


Figura IV.5. Curva ajustada de cinética de secado del experimento 9.

Como se observa en la Figura IV.5 el ajuste de la curva de cinética de secado es bueno, obteniéndose un coeficiente de correlación (R^2) de 0.9877.

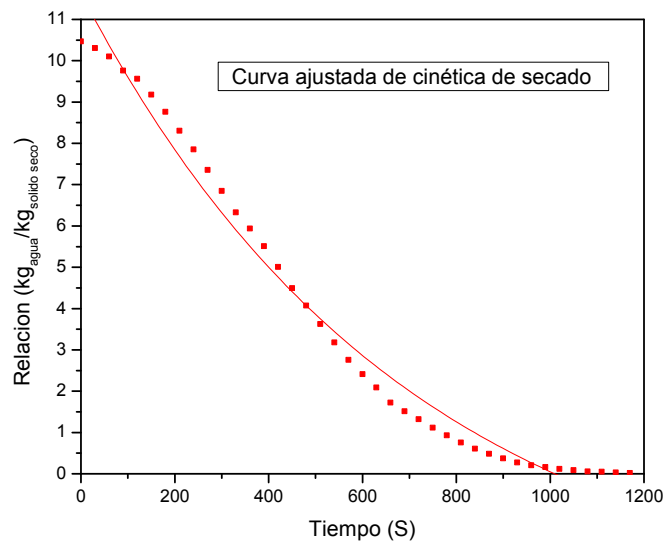


Figura IV.6. Curva ajustada de cinética de secado del experimento 12.

Como última curva de ajuste, en la Figura IV.6, se observa un buen ajuste de la curva de cinética de secado obteniéndose un coeficiente de correlación (R^2) de 0.9824.

En las Figuras IV.7, IV.8 y IV.9 se muestran las curvas de velocidad de secado y los diferentes períodos que la conforman.

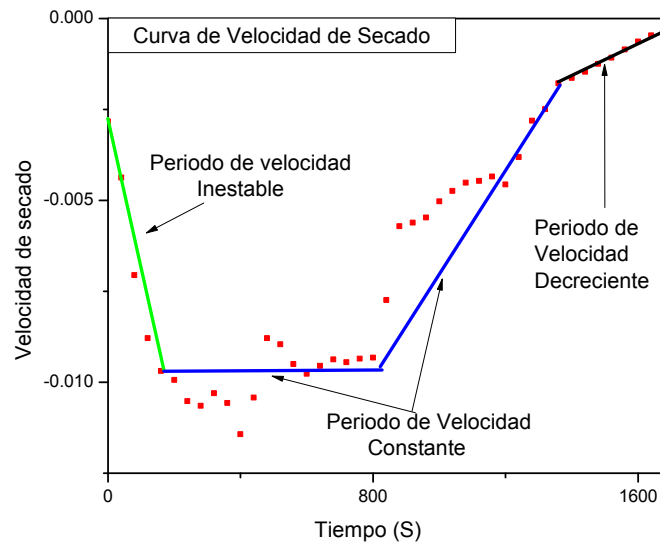


Figura IV.7. Curva de velocidad de secado del experimento 2.

En la Figura IV.7 se muestra el comportamiento de los períodos de la velocidad durante el proceso de secado obteniéndose dos en el período de velocidad constante.

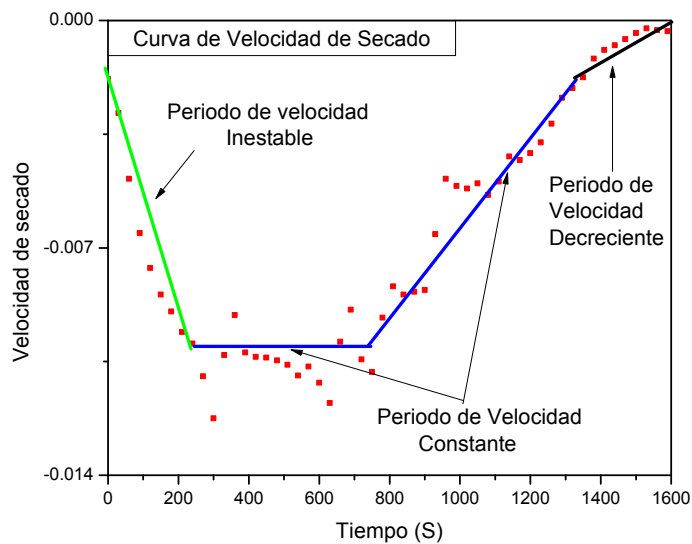


Figura IV.8. Curva de velocidad de secado del experimento 9.

En la Figura IV.8 se muestra el comportamiento de los períodos de la velocidad durante el proceso de secado obteniéndose dos en el período de velocidad constante. Este comportamiento también ha sido observado en los trabajos de Herrera (2012) y Ruiz (2012).

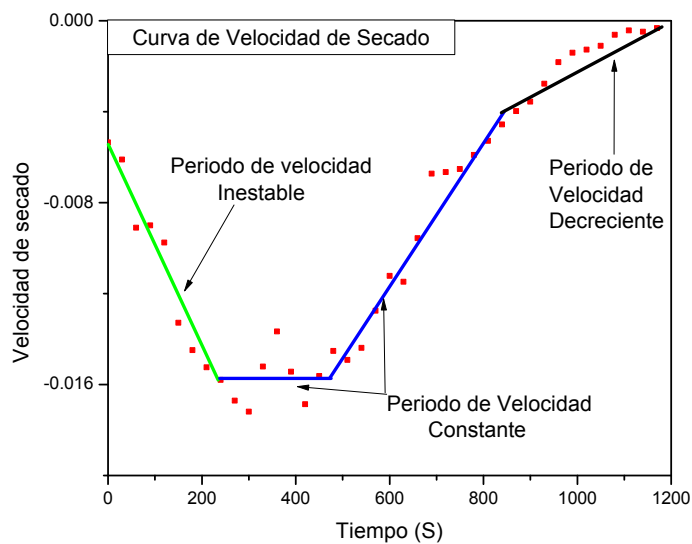


Figura IV.9. Curva de velocidad de secado del experimento 12.

En la Figura IV.9 se muestra el comportamiento de los períodos de la velocidad durante el proceso de secado obteniéndose dos en el período de velocidad constante.

En una aplicación típica de secado por microondas, un nivel de potencia de microondas fijo se aplica durante todo el proceso de secado, pero un control de temperatura

por lo general no está incluido. Con esta disposición, un proceso de secado por microondas se puede dividir en tres períodos de acuerdo con las variaciones de temperatura: un período de calentamiento en la que aumenta la temperatura de la muestra con poca eliminación de humedad (período de velocidad inestable); un período de temperatura constante en el que la mayor parte del secado se lleva a cabo (período de velocidad constante), y un período de sobre calentamiento cuando disminuye la velocidad de secado (período de velocidad decreciente) y la temperatura de la muestra aumenta rápidamente (Lu y colaboradores, 1999).

Sin embargo, el secado por microondas, cuando se aplica inadecuadamente da lugar a un producto de mala calidad (Yongsawatdigul y Gunasekaran, 1996).



Figura IV.10. Fotografías del producto del experimento 16.

Mientras que los efectos de secado en el primer y segundo período son aceptables, la carbonización del producto a menudo se produce en el último período cuando la temperatura alcanza un valor indeseablemente alto (Figura IV.10).

En las Figuras IV.11, IV.12 y IV.13, se muestran las fotografías de los experimentos en los cuales se obtuvieron los mejores resultados.



Figura IV.11. Fotografías del producto del experimento 2.

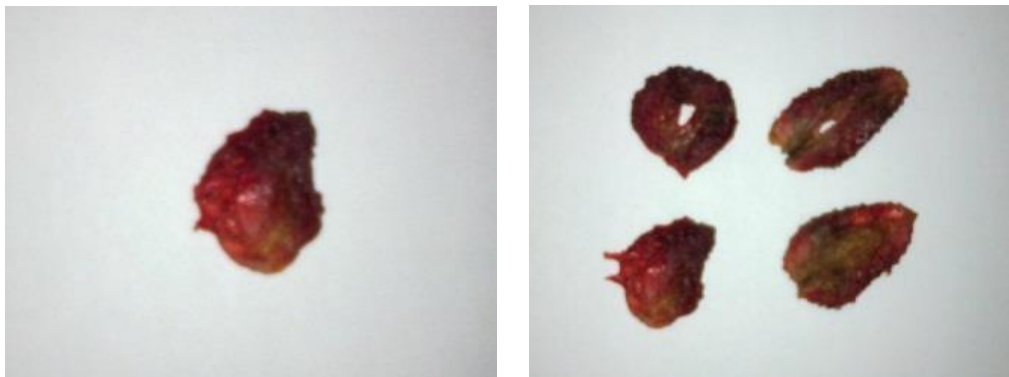


Figura IV.12. Fotografías del producto del experimento 9.

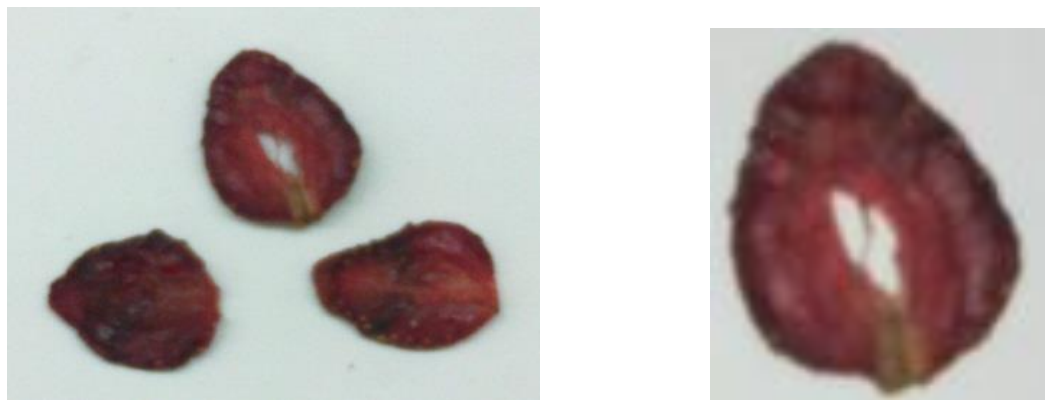


Figura IV.13. Fotografías del producto del experimento 12.

En todas las fotografías del producto obtenido, se observa el característico encogimiento que sufren los productos al secarlos y también un aumento de la coloración de la fresa en el contorno de cada muestra.

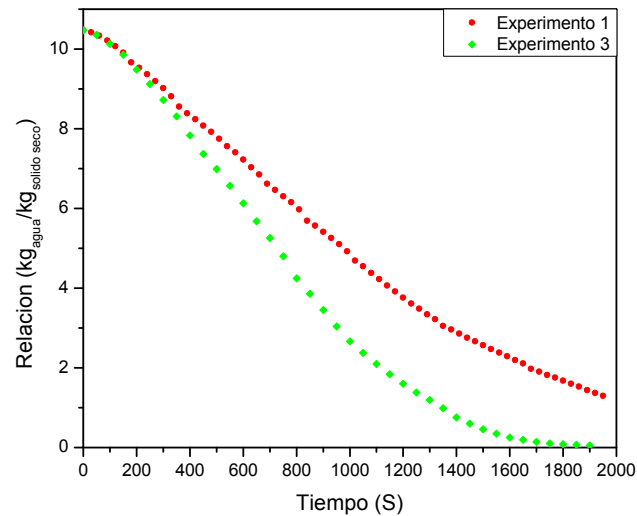


Figura IV.14. Curvas de cinética de secado a intervalos de tiempo de 30 y 50 segundos y un nivel de potencia del 30%.

En la Figura IV.14 se observa que usando un mismo nivel de potencia pero diferentes intervalos de tiempo, la eliminación de la humedad es más lenta a menor intervalo de tiempo.

La temperatura y el nivel de potencia de microondas son los dos factores más importantes en el secado por microondas. Estos dos factores influyen significativamente en los parámetros de secado, tales como el tiempo, curva, velocidad, y eficiencia del secado, y la calidad del producto final. Para mejorar el secado por microondas, un gran número de estudios se han llevado a cabo para investigar los efectos de diferentes niveles de potencia de microondas y temperaturas de secado, y diferentes modelos de predicción se han establecido (Adedeji y colaboradores, 2009; Andrés y colaboradores, 2004; Changrue y colaboradores, 2008; Cui y colaboradores, 2005; Clary y colaboradores, 2005; Lu y colaboradores, 1999).

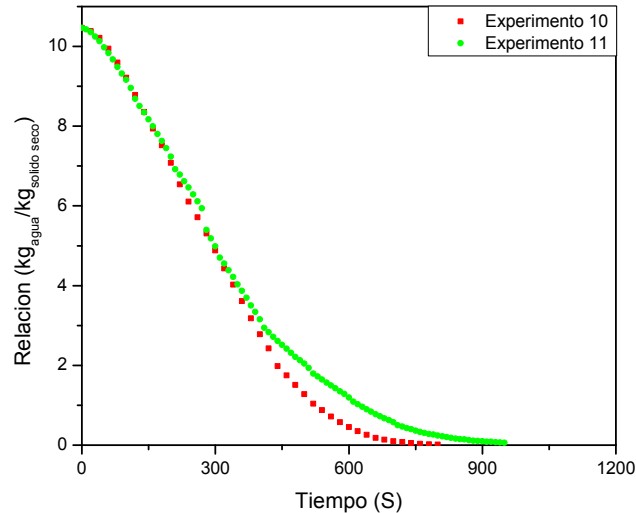


Figura IV.15. Curvas de cinética de secado a intervalos de tiempo de 10 y 20 segundos y un nivel de potencia del 60%.

En la Figura IV.15 se observa que usando un mismo nivel de potencia pero diferentes intervalos de tiempo, la eliminación de la humedad es más rápida a mayor intervalo de tiempo.

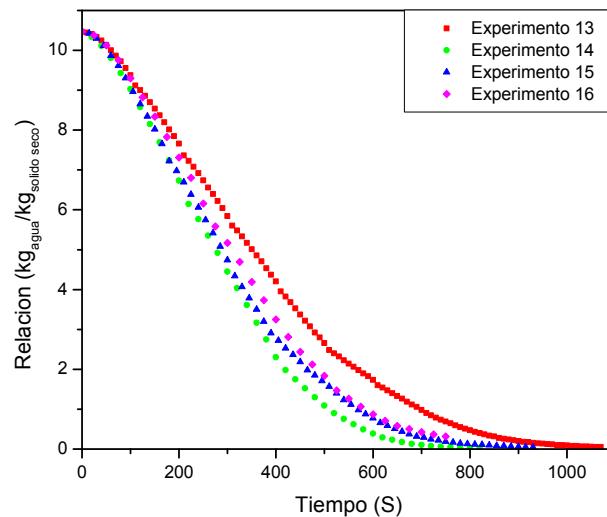


Figura IV.16. Curvas de cinética de secado a intervalos de tiempo de 10, 20, 15 y 25 segundos respectivamente y un nivel de potencia del 70%.

En la Figura IV.16 se observa que también la eliminación de humedad usando un mismo nivel de potencia es mayor cuando se incrementa el intervalo de tiempo, aunque experimentar con intervalos mayores a 20 segundos y un nivel de potencia del 70% puede causar que el producto final se queme. Es por eso que, en el experimento 16 se obtuvo una mayor humedad que en los otros, porque ya comenzaba a presentar en el centro de la muestra color oscuro, indicativo de la iniciación de la carbonización del material.

Conclusiones.

1. El mejor ajuste a la curva de cinética de secado es la del experimento 2 con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.9913, aunque no se obtuvo la menor humedad.
2. La menor humedad del producto seco fue la del experimento 12 con 0.91% por las condiciones de experimentación.
3. El comportamiento de las curvas de cinética de secado es de una curva exponencial decreciente.
4. En los experimentos 2, 9 y 12, se muestran las curvas de cinética de secado teniendo un buen ajuste ya que su R^2 es mayor de 0.98.
5. En la curva de velocidad de secado, los experimentos 2, 9 y 12 tienen dos períodos de velocidad constante.
6. Al obtener humedades menores al 10%, la de vida de anaquel del producto seco aumenta, ya que a dicha humedad no hay crecimiento de microorganismos y tampoco degradación del producto.
7. Experimentar con intervalos mayores a 20 segundos y niveles de potencia de 70% puede causar que el producto final se queme.
8. En la Figura IV.16 se muestra que utilizando un mismo nivel de potencia pero diferentes intervalos de tiempo, la eliminación de la humedad es más rápida a mayor intervalo de tiempo.

Bibliografía.

Aciemo, D.; Barba, A.A.; D'Amore, M. 2004. Heat transfer phenomena during processing materials with microwave energy. *Heat and Mass Transfer* 40 (5), pp. 413–420.

Adedeji, A.A.; Ngadi, M.O.; Raghavan, G.S.V. 2009. Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of Food Engineering* 91 (1), pp. 146–153.

Adu B; Otten L.; Afenya E; Groenevelt P. 2005. Thermodynamics of microwave (polarized) system. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 30, pp. 90–96.

Aguilera, J.M.; Chiralt, A.; Fito, P. 2003. Food dehydration and product structure. *Trends in Food Science and Technology* 14, pp. 432–437.

Ahmed, J.; Kaur, A.; Shivhare, U. 2002. Colour degradation kinetics of spinach, mustard leaves, and mixed puree. *Journal of Food Science* 67, pp. 1088–1091.

Ahmed, J.; Ramaswamy, H. S.; Raghavan, V. G. S. 2007. Dielectric properties of Indian Basmati rice flour slurry. *Journal of Food Engineering* 80 (4), pp. 1125–1133.

Akpınar, E. K. 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering* 73 (1), pp. 75–84.

Akpınar, E. K.; Bicer, Y.; Yildiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering* 59 (1), pp. 99–104.

Al-Harashsheha, M.; Al-Muhtasebb, A. H. 2009. Mageec, T.R.A. Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing* 48, pp. 524–531.

Al-Holy, M.; Wang, Y.; Tang, J.; Rasco, B. 2005. Dielectric properties of salmon (*Oncorhynchus keta*) and sturgeon (*Acipenser transmontanus*) caviar at radio-frequency (RF) and microwave (MW) pasteurization frequencies. *Journal of Food Engineering* 70 (4), pp. 564–570.

Alibas I. 2007. Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT-Food Science and Technology* 40, pp. 1445–1451.

Alibas, I.; Akbudak, B.; Akbudak, N. 2005. Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering* 78 (2), pp. 577–583.

Alton, W. J. 1998. Microwave pasteurization of liquids. *Society of Manufacturing Engineers Paper No. EM98-211*.

Andrés, A.; Bilbao, C.; Fito, P. 2004. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air– microwave dehydration. *Journal of Food Engineering* 63 (1), pp. 71–78.

Avila, I. M. L. B.; Silva, C. L. M. 1999. Modelling kinetics of thermal degradation of colour in peach puree. *Journal of Food Engineering* 39 (2), pp. 161–166.

Babalís, S. J.; Belessiotis, V. G. 2004. Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin layer drying of figs. *Journal of Food Engineering* 65 (3), pp. 449–458.

Badeka, A.B.; Pappa, K.; Kontominas, M.G. 1999. Effect of microwave versus conventional heating on the migration of dioctyl adipate and acetyltributyl citrate plasticizers from food grade PVC and P (VDC/VC) films into fatty foodstuffs. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung A* 208, pp. 429–433.

Barbanti, D., Mastrocola, D., Severine, C., 1994. Drying of plums. A comparison among twelve cultivars. *Sciences des Aliments* 14, pp. 61–73.

Basak, T. 2003. Analysis of resonance during microwave thawing of slabs. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (22), pp. 4279-4301.

Basak, T. 2004. Analysis of microwave propagation for multilayered material processing Lambert's law versus exact solution. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 43 (23), pp. 7671-7675.

Basak, T.; Ayappa, K. G. 1997. Analysis of microwave Thawing of slabs with effective heat capacity method. *AIChE Journal*, 43 (7), pp. 1662-1674.

Basak, T.; Ayappa, K. G. 2001. Influence of internal convection during microwave thawing of cylinders. *AIChE Journal*, 47 (4), pp. 835-850.

Basak, T.; Ayappa, K. G. 2002. Role of length scales on microwave thawing dynamics in 2D cylinders. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, pp. 4543-4559.

Beaudry, C.; Raghavan, G. S. V.; Ratti, C.; Rennie, T. J. 2004. Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. *Drying Technology*, 22(3), pp. 521–540.

Bengtsson, N. E.; Risman, P. O. 1971. Dielectric properties of foods at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique. *Journal of Microwave Power*, 6, pp. 8-24.

Bengtsson, N.E.; Ohlsson, T. 1974. Microwave heating in the food industry. *Proceedings of the IEEE* 62 (1), pp. 44–45.

Bezyma, L. A. ; Kutovoy, V. A. 2005. Vacuum drying and hybrid technologies. *Steward Post-Harvest Rev* (4), pp. 1046-1057.

Bohr, H.; Bohr, J. 2000. Microwave-enhanced folding and denaturation of globular proteins. *Physical Review E: Statistical Physics in Plasmas Fluids and Related Interdisciplinary Topics*, 61(4 Pt B), pp. 4310–4314.

Bondaruk, J.; Markowski, M.; Błaszczak, W. 2007. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. *Journal of Food Engineering* 81 (2), pp. 306–312.

- Buffler, C. R. 1993. Microwave Cooking and Processing. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Calay, R. K.; Newborough, M.; Probert, D.; Calay, P. S. 1995. Predictive equations for the dielectric properties of foods. *International Journal of Food Science and Technology* 29, pp. 699–713.
- Canjura, F. L.; Schwartz, S. J.; Nunes, R. V. 1991. Degradation kinetics of chlorophylls and chlorophyllides. *Journal of Food Science* 56, pp. 1639–1643.
- Carreño-Olejua, R.; Hofacker, W. C.; Hensel, O. 2010. High-Pressure Water-Jet Technology as a Method of Improving the Quality of Post-Harvest Processing. *Food Bioprocess Technol* 3, pp. 853–860; DOI 10.1007/s11947-010-0428-z.
- Castro-Giráldez, M.; Fito, P.J.; Toldrá, F.; Fito, P. 2010. Physical sensors for quality control during processing. In: Nollet, Leo.M.L., Toldrá, Fidel. (Eds.), *Handbook of Meat Processing*. CRC Press, FL, USA, pp. 7–34.
- Chamchong, M.; Datta, A. K. 1999. Thawing of food in a microwave oven. II. Effect of load geometry and dielectric properties. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 34 (1), pp. 22–31.
- Changrue, V.; Orsat, V.; Raghavan, G.S.V. 2008. Osmotically dehydrated microwavevacuum drying of strawberries. *Journal of Food Processing and Preservation* 32 (5), pp. 798–816.
- Chen, D. S.; Singh, R. K.; Haghghi, K.; Nelson, P. E. 1993. Finite element analysis of temperature distribution in microwave cylindrical potato tissue. *Journal of Food Engineering* 18 (4), pp. 351-368.
- Chua, K. J.; Mujumdar, A. S.; Chou, S. K.; Hawlader, M. N. A.; Ho, J. C. 2000. Convective drying of banana, guava and potato pieces: Effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and colour change. *Drying Technology*, 18 (4-5), pp. 907-936.
- Clary, C.D.; Wang, S.; Petrucci, V.E. 2005. Fixed and incremental levels of microwave power application on drying grapes under vacuum. *Journal of Food Science* 70 (5), pp. 344–349.
- Clydesdale, F.M. 1978. Colourimetry-methodology and applications. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 10, pp. 243–301.
- Contreras, C.; Martín, M.E.; Martínez-Navarrete, N.; Chiralt, A. 2005. Effect of vacuum impregnation and microwave application on structural changes which occurred during air-drying of apple. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 38, pp. 471–477.
- Contreras, C.; Martín, M.E.; Martínez-Navarrete, N.; Chiralt, A. 2007. Influence of osmotic pre-treatment and microwave application on properties of air dried strawberry related to structural changes. *European Food Research and Technology* 224 (4), pp. 499–504.
- Contreras, C.; Martín-Esparza, M. E.; Chiralt, A.; Martínez-Navarrete, N. 2008. Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering*. 88, pp. 55-64.

- Corzo, O.; Bracho, N.; Pereira, A.; Vásquez, A. 2008. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *LWT-Food Science and Technology* 41 (10), pp. 2023-2028.
- Cui, Z.W.; Xu, S.Y.; Sun, D.W.; Chen, W. 2005. Temperature changes during microwave-vacuum drying of sliced carrots. *Drying Technology* 23, pp. 1057-1074.
- Cunningham, S.E.; McMinn, W.A.M.; Magee, T.R.A.; Richardson, P.S. 2008a. Effect of processing conditions on the water absorption and texture kinetics of potato. *Journal of Food Engineering* 84 (2), pp. 214–223.
- Cunningham, S.E.; McMinn, W.A.M.; Magee, T.R.A.; Richardson, P.S. 2008b. Experimental study of rehydration kinetics of potato cylinders. *Food and Bioproducts Processing* 86 (C1), pp. 15-24.
- Datta, K.; Anantheswaran, R. C. 2001. *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*.
- de Pomerai, D. I.; Smith, B.; Dawe, A.; North, K.; Smith, T.; Archer, D. B. y colaboradores. 2003. Microwave radiation can alter protein conformation without bulk heating. *FEBS Letters*, 543(1–3), pp. 93–97.
- Decareau, R.V. 1985. *Microwaves in the Food Processing Industry*. Academic Press. Orlando, FL.
- Dermesonlouoglou, D. K.; Giannakourou, M. C.; Taoukis, P. S. 2007. Kinetic modelling of the degradation of quality of osmodehydrofrozen tomatoes during storage. *Food Chemistry* 103, pp. 985–993.
- Doland, J.; Datta, A. 1993. Temperature profiles in microwave heating of solids: A systematic study. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 28 (2), pp. 58-67.
- Doymaz, I. 2008. Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing* 47 (5), pp. 914–919.
- Doymaz, I.; Tugrul, N.; Pala, M. 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering* 77 (3), pp. 559-565.
- Duygu E. 2011. Microwave drying and moisture diffusivity of white mulberry: experimental and mathematical modeling. *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (10), pp. 2711-2718.
- El-Beltagy, A.; Gamea, G. R.; Amer Essa, A. H. 2007. Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78, pp. 456-464.
- Everard, C. D.; Fagan, C. C.; O'Donnell, C. P.; O'Callaghan, D. J.; Lyng, J. G. 2006. Dielectric properties of process cheese from 0.3 to 3 GHz. *Journal of Food Engineering* 75 (3), pp. 415–422.
- Falade, K. O.; Abbo, E. S. 2007. Air drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits.

- Feng, H.; Tang, J.; Cavalirie, R.P.; Plumb, O.A. 2001. Heat and mass transport in microwave drying of porous materials in a spouted bed. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 47, pp. 1499-1512.
- Garcia, A.; Torres, J. L.; Prieto, E.; De Blas, M. 2001. Dielectric properties of grape juice at 0.2 and 3 GHz. *Journal of Food Engineering* 48 (3), pp. 203-211.
- Garcia, R. 1988. Drying of bananas using microwave and air ovens. *International Journal of Food Science and Technology* 23, pp. 73-80.
- Geedipalli, S.S.R.; Rakesh, V.; Datta, A. K. 2007. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. *Journal of Food Engineering* 82 (3), pp. 359-368.
- George, S. D.; Cenkowski, S.; Muir, W. E. 2004. A review of drying technologies for the preservation of nutritional compounds in waxy skinned fruit. *North Central ASA/CSAE Conf, Winnipeg, Manitoba, Canada, 24-25 September*, pp. MB 04-104.
- Giner, A. S. 2009. Influence of internal and external resistances to mass transfer on the constant drying rate period in high-moisture foods. *Biosystems Engineering* 102, pp. 90–94.
- Gnanasekharan, V.; Shewflet, R. L.; Chinnan, M. S. 1992. Detection of colour changes in green vegetables. *Journal of Food Science* 57, pp. 149-154.
- Grabowski, S.; Marcotte, M.; Ramaswamy, H. S. 2003. Drying of fruits, vegetables and spices. In: *Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea and Spices*. Chakraverty A, Mujumdar AS, Raghavan GSV, Rawaswamy HS (ed), Marcel Dekker, New York, Ch 23, pp. 653-695.
- Grimwood, N. 1989. The convenience culture-producing the quality in microwave foods: Part one. *European Food and Drink Review*, Autumn, pp. 11–12.
- Guan, D.; Cheng, M.; Wang, Y.; Tang, J. 2004. Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes. *Journal of Food Science* 69, FEP30–FEP37.
- Gunasekaran, N.; Mallikarjunan, P.; Eifert, J. 2005. Effect of fat content and temperature on dielectric properties of ground beef. *Transaction of the ASAE* 48 (2), pp. 673-680.
- Gunasekaran, S.; Yang, H.W. 2007a. Effect of experimental parameters on temperature distribution during continuous and pulsed microwave heating. *Journal of Food Engineering* 78 (4), pp. 1452-1456.
- Gunasekaran, S.; Yang, H.W. 2007b. Optimization of pulsed microwave heating. *Journal of Food Engineering* 78 (4), pp. 1457-1462.
- Gupte, S. M.; El-Bisi, H. M.; Francis, F. J. 1963. Kinetics of thermal degradation of chlorophyll in spinach puree. *Journal of Food Science* 29, pp. 379-382.
- Hasna, A. H. 2003. Curing starch based adhesives, microwave or conventional. *Int. J. Mater. Prod. Technol* 19 (3-4), pp. 259-274.

Hasted, J. B.; Ritson, D. M.; Collie, C. H. 1948. Dielectric properties of aqueous ionic solutions. Parts 1 and 2. *Journal of Chemical Physics*, 16 (1), pp. 1-21.

Hayakawa, K. 1977. Influence of heat treatment on the quality of vegetables: Changes in visual green colour. *Journal of Food Science* 42, pp. 778-781.

Hayashi, H. 1989. Drying technologies of foods-their history and future, *Drying Technology* 7, pp. 315-369.

Hernández, M. T.; González, M. 2002. Synthesis of resins as alpha-alumina precursors by the Pechini method using microwave and infrared heating. *J. Eur. Ceram. Soc.* 22 (16), pp. 2861-2868.

Herrera, O. A. 2012. Estudio de la cinética de secado de manzana (*Pyrus malus* L.) variedad "Gala" utilizando un horno de microondas. Tesis, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, México, pp. 61.

Hulls, P.J. 1982. Development of the industrial use of dielectric heating in the United Kingdom. *Journal of Microwave Power* 17 (1), pp. 29-38.

Hulls, P.J.; Shute, R. 1981. Dielectric heating in industry. Applications of radio frequency and microwaves. *IEE Proceedings, Part A: Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews* 128 (9), pp. 583-588.

Jacob, J.; Chia, L. H. L.; Boey, F. Y. C. 1995. Thermal and nonthermal interaction of microwave radiation with materials. *Journal of Material Science*.

Jansen, W.; Van der Wekken, B. 1991. Modeling of dielectrically assisted drying. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 26 (4), pp. 227-236.

Jones, P.L. 1992. Dielectric heating for food processing. *Nutrition and Food Science* 92 (2), pp. 14-15.

Kaya, A.; Aydin, O.; Demirtas, C. 2007. Drying kinetics of red delicious apple. *Biosystems Engineering* 96 (4), pp. 517-524.

Khraisheh, M. A. M.; Cooper, T. J. R.; Magee, T. R. A. 1997a. Microwave and air drying I. Fundamental considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric power absorption. *Journal of Food Engineering* 33 (1-2), pp. 207-219.

Khraisheh, M.; McMinn, M.; Magee, T. 2000. A multiple regression approach to the combined microwave and air drying process. *Journal of Food Engineering* 43 (4), pp. 243-250.

Khraisheh, M.A.; Cooper, T.J.; Magee, T.R. 1997b. Shrinkage characteristic of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions. *Drying Technology International* 15, pp. 1003-1022.

Khraisheh, M.A.M.; McMinn, W.A.M.; Magee, T.R.A. 2004. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International* 37 (5), pp. 497-503.

Kiranoudis, C. T.; Tsami, E.; Maroulis, Z. B. 1997. Microwave vacuum drying kinetics of some fruits. *Drying Technology* 15 (10), pp. 2421-2440.

Kisakürek, B. 1995. Flash Drying, in Majumdar, A.S. ed. *Handbook of Industrial Drying*, vol. 1, Marcel Dekker, New York.

Kisakürek, B., Flash Drying, in Majumdar, A.S., ed., *Handbook of Industrial Drying*, vol. 1, Marcel Dekker, New York (1995)

Krokida, M. K.; Maroulis, Z. B. 1999. Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. *Drying Technology* 17 (3), pp. 449–466.

Lakins, D.G.; Echeverry, A.; Alvarado, C.Z.; Brooks, J.C.; Brashears, M.T.; Brashears, M.M. 2008. Quality of and mold growth on white enriched bread for military rations following directional microwave treatment. *Journal of Food Science* 73, pp. M99–M103.

Lara, I.; García, P.; Vendrell, M. 2004. *Postharvest Biol Tec* 34, pp. 331–339.

Lefeuvre, S. 1981. Microwave drying of porous materials. *Physical Technology* 12, pp. 155-161.

Lester E.; Kingman S.; Wong K.H.; Rudd C.; Pickering S.; Hilal N. 2004. Microwave heating as a means for carbon fibre recovery from polymer composites: a technical feasibility study. *Mater. Res. Bull.* 39 (10), pp. 1549–1556.

Lewicki, P.P. 2006. Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science and Technology* 17, pp. 153-163.

Li, A.; Barringer, S. A. 1997. The effect of salt on the dielectric properties of ham at sterilization temperatures. *IFT Annual Meeting Book of Abstracts*, 55 (5), p. 155.

Li, Z.; Raghavan, G.S.V.; Orsat, V. 2010a. Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 99 (3), pp. 263-268.

Li, Z.; Raghavan, G.S.V.; Wang, N. 2010b. Apple volatiles monitoring and control in microwave drying. *LWT-Food Science and Technology* 43, pp. 684-689.

Li, Z.; Raghavan, G.S.V.; Wang, N.; Gariepy, Y. 2009. Real-time, volatile-detection-assisted control for microwave drying. *Computers and Electronics in Agriculture* 69, pp. 177-184.

Lian, G.; Harris, C. S.; Evans, R.; Warboys, M. 1997. Coupled heat and moisture transfer during microwave vacuum drying. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 32, pp. 34–44.

Lin, Y. E.; Anantheswaran, R. C. T.; Puri, V. M. 1995. Finite element analysis of microwave heating of foods. *Journal of Food Engineering* 25 (1), pp. 85-112.

Litvin, S.; Mannheim, C.H.; Miltz, J. 1998. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. *Journal of Food Engineering* 36 (1), pp. 103-111.

Liu, Y.; Tang, J.; Mao, Z. 2009. Analysis of bread dielectric properties using mixture equations. *Journal of Food Engineering* 93, pp. 72–79.

Loughrey, K. 2000. Measurement of colour. In G. J. Lauro & F. J. Francis (Eds.), *Natural food colourants*. New York: Marcel Dekker. pp. 273–288.

Loupy (Ed.), *Microwaves in Organic Synthesis*, Wiley–VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2002.

Lu, L.; Tang, J.; Liang, L. 1998. Moisture distribution in spherical foods in microwave drying. *Drying Technology* 16 (3-5), pp. 503–524.

Lu, L.; Tang, J.; Ran, X. 1999. Temperature and moisture changes during microwave drying of sliced food. *Drying Technology* 17 (3), pp. 413-432.

Lydersen, A. L. 1983. *Mass transfer in engineering practice*. New York: John Wiley and Sons.

Lyins, D. W.; Hatcher, J. D. 1972. Drying of a porous medium with internal heat generation. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15, pp. 897-905.

Lyng, J. G.; Scully, M.; McKenna, B. M. 2002. The influence of compositional changes in beefburgers on their temperatures during microwave heating and their thermal and dielectric properties. *Journal of Muscle Food* 13, pp. 123-142.

Lyng, J. G.; Zhang, L.; Brunton, N. P. 2005. A survey of the dielectric properties of meats and ingredients used in meat product manufacture. *Meat Science*, 69 (4), pp. 589-602.

Marabi, A.; Livings, S.; Jacobsons, M.; Saguy, I. S. 2003. Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *European Food Research Technology* 217, pp. 311-318.

Márquez Carlos A.; De Michelis Antonio. 2011. Comparison of Drying Kinetics for Small Fruits with and without Particle Shrinkage Considerations. *Food Bioprocess Technology* 4, pp. 1212–1218. DOI 10.1007/s11947-009-0218-7.

Marra, F.; Zhang, L.; Lyng, J.G. 2009. Radio frequency treatment of foods: review of recent advances. *Journal of Food Engineering* 91 (4), pp. 497-508.

Martin, D. J.; Tsen, C. C. 1981. Baking high ratio white layer cakes with microwave energy. *Journal of Food Science* 46, pp. 1507-1513.

Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44 (2), pp. 71-78.

Maskan, M. 2001. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48 (2), pp. 169-175.

Mayor, L.; Sereno, A.M. 2004. Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering* 61 (3), pp. 373-386.

McLoughlin C.M.; McMinn W.A.M.; Magee T.R.A. 2003. Microwave drying of multicomponent powder systems. *Drying Technology* 21, pp. 293-309.

McMinn, W.; Khraisheh, M.; Magee, T. 2003. Modelling the mass transfer during convective, microwave and combined microwave convective drying of solid slabs and cylinders. *Food Research International* 36, pp. 977-983.

Mermelstein, N. H. 1997. How food technology covered microwaves over the years. *Food Technology* 51 (5), pp. 82-84.

Metaxas, A. C.; Meredith, R. J. 1983a. Numerical heat transfer and fluid flow. London: McGraw-Hill.

Metaxas, A. C.; Meredith, R. J. 1983b. Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.

Moraga, G.; Martínez-Navarrete, N.; Chiralt, A. 2004. *Journal of Food Engineering*, 62, pp. 315–321.

Mowlah T. K.; Kamoi, I.; Obara, T. 1983. Water transport mechanism and some aspects of quality changes during air dehydration of bananas. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 16, pp. 103-107.

Mudgett, R. E. 1995. Electrical properties of foods. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.). *Engineering properties of foods*. New York: Marcel Dekker, Inc. pp. 389–455.

Mudgett, R. E.; Goldblith, S. A.; Wang, D. I. C.; Westphal, W. B. 1997. Prediction of dielectric properties in solid foods of high moisture content at ultrahigh and microwave frequencies. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1, pp. 119-151.

Mudgett, R.E. 1989. Microwave food processing. *Food Technology* 43 (1), pp. 117-126.

Mujumdar, A. S.; Chung, L. L. 2010. Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing; *Food Bioprocess Technology* 3, pp. 843–852. DOI 10.1007/s11947-010-0353-1.

Mujumdar, A.S., 2000. *Drying Technology in Agricultural and Food Science*. Science Publishers, Inc., Plymouth, UK. pp. 61–98, 253–286.

Mujumdar, A.S.; Menon, A. S. 1995. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers, in: A.S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying*, Vol. 1, Marcel-Dekker Inc., New York, USA, pp. 1-39.

Mulet, A.; Berna, A.; Rossello, C. 1989. Drying kinetics of some fruits. *Drying Technology* 15 (5), pp. 1399-1418.

Nelson, S. O. 1994. Measurement of microwave dielectric properties of particulate materials. *Journal of Food Engineering* 21 (3), pp. 365-384.

Ni, H.; Datta, A. K.; Torrance, K. E. 1999. Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: A multiphase porous media model. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42, pp. 1501–1512.

Nijhuis, H. H.; Torringa, H. M.; Muresan, S.; Yukel, D.; Leguijt, C.; Kloek, W. 1998. Approaches to improving the quality of dried fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 9, pp. 13-20.

Nindo, C. I.; Sun, T.; Wang, S. W.; Tang, J.; Powers, J. R. 2003. Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus. *TWT-Food Science and Technology*, 36, pp. 507-516.

Nisha, P.; Singhal, R. S.; Pandit, A. B. 2004. A study on the degradation kinetics of visual green colour in spinach (*Spinacea oleracea* L.) and the effect of salt therein. *Journal of Food Engineering* 64 (1), pp. 135-142.

Ofoli, R. Y.; Komolprasert, V. 1988. On the thermal modeling of foods in electromagnetic fields. *Journal of Food Processing and Preservation* 12, pp. 219-241.

Ohlsson, T.; Henriques, M.; Bengtsson, N. E. 1974. Dielectric properties of model meat emulsions at 900 and 2800 MHz in relation to their composition. *Journal of Food Science* 39, pp. 1153-1156.

Olivas, R.; Molina, F. J.; Pérez, A.; Ortega, E. 1999. Development of mathematical model for drying of jalapeño peppers in batch process, Conference in Annual Meeting of American Institute of Chemical Engineers, New York, U.S.A.

Oliveira, M. E. C.; Franca, A. S. 2003. Microwave heating of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 53, pp. 347–359.

Oliveira, M. E. C.; França, A. S. 2002. Microwave heating of foodstuff. *Journal of Food Engineering* 53 (4), pp. 347-359.

Orsay, B.; Changrue, V.; Raghavan, G. S. V. 2006. Microwave drying of fruits and vegetables. *Steward Postharvest Review* 4 (6), pp.1-7.

Ozkan, M.; Yemenicioglu, A.; Asefi, N.; Cemeroglu, B. 2002. Degradation kinetics of anthocyanins from sour cherry, pomegranate, and strawberry juices by hydrogen peroxide. *Journal of Food Science* 67, pp. 525-529.

Padua, G. W. 1993. Proton NMR and dielectric measurements on sucrose filled agar gels and starch pastes. *Journal of Food Science*, 58 (3), pp. 603-604, 626.

Pagnotta, M.; Pooley, C. L. F.; Gurland, B.; Choi, M. 1993. Microwave activation of the mutarotation of α -D-glucose: example of an intrinsic microwave effect. *Physical Organic Chemistry*, 6, pp. 407–411.

- Panyawong, S.; Devahastin, S. 2007. Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor. *Journal of Food Engineering* 78 (1), pp. 151–161. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.09.012.
- Patras, A.; Brunton, N. P.; Tiwari, B. K.; Butler, F. 2009. Stability and degradation kinetics of bioactive compounds and colour in strawberry jam during storage. *Food and Bioprocess Technology*. DOI:10.1007/s11947-009-0226-7.
- Piotrowski, D.; Lenart, A.; Wardzynski, A. 2004. Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. *Journal of Food Engineering* 65 (4), pp. 519-525.
- Piyasena, P; Dussault, C. 1999. Evaluation of a 1.5 kW radio frequency heater for its potential use in a high temperature short time (HTST) process. In CIFST Annual Conference. Kelowna, BC, June 1999.
- Porcelli, M.; Cacciapuoti, G.; Fusco, S.; Massa, R.; d'Ambrosio, G.; Bertoldo, C., y colaboradores. 1997. Non-thermal effects of microwaves on proteins: thermophilic enzymes as model system. *FEBS Letters*, 402(2–3), pp. 102–106.
- Prabhanjan, D.G.; Ramaswamy, H.S.; Raghavan, G. S. V. 1995. Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering* 25 (2), pp. 283-293.
- Prakash, S.; Jha, S.K.; Datta, N. 2004. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. *Journal of Food Engineering*. 62, pp. 305-313.
- Prasad, K. D. V.; Yarlagadda; Chai, T. C. 1998. An investigation into welding of engineering thermoplastic using focused microwave energy, *Journal of Material Processing and Technology* 74 (1-3), pp. 199-212.
- Prothon, F.; Ahrné, L.; Funebo, T.; Kidman, S.; Langton, M.; Sjöholm, I. 2001. Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 34, pp. 95–101.
- Raghavan, G. S. V.; Orsat, V. 1998. Electro-technology in drying and processing of biological materials. Keynote presentation at 11th International Drying Symposium (IDS 98), Halkididi, Greece 19-22 August, pp. 456-463.
- Raghavan, G.; Silveira, A. 2001. Shrinkage characteristics of strawberries osmotically dehydrated in combination with microwave drying. *Drying Technology* 19 (2), pp. 405-414.
- Roebuck, B. D.; Goldblith, S. A. 1972. Dielectric properties of carbohydrate-water mixtures at microwave frequencies. *Journal of Food Science*, 37, pp. 199-204.
- Romano, V. R.; Marra, F.; Tamaro, U. 1995. Modelling of microwave heating of foodstuff: study on the influence of sample dimensions with a FEM approach. *Journal of Food Engineering* 71 (3), pp. 233-241.

- Romano, V.; Marra, F.; Tamaro, U. 2005. Modelling of microwave heating of foodstuff: study on the influence of sample dimensions with a FEM approach. *Journal of Food Engineering* 71 (3), pp. 233–241.
- Ruiz, C. A. 2012. Estudio de la cinética y condiciones de operación para secar manzana (*Pyrus malus* L.) variedad "Golden" por medio de microondas. Tesis, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, México, pp. 57.
- Ruiz-Diaz, G.; Martínez-Monzó, J.; Fito, P.; Chiralt, A. 2003. Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4, pp. 203-209.
- Ryan Stoneham, T.; Tong, C. H. 2000. Degradation kinetics of chlorophyll in peas as a function of pH. *Journal of Food Science* 65, pp. 1296-1302.
- Ryynänen, S. 1995. The electromagnetic properties of food materials: A review of the basic principles. *Journal of Food Engineering*, 26 (4), pp. 409-429.
- Sacilik, K.; Elicin, A. K. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering* 73 (3), pp. 281-289.
- Sagar V.R.; Suresh K. P. 2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *J Food Sci Technol* 47 (1), pp. 15–26.
- Saltiel, G.; Datta, A. K. 1999. Heat and mass transfer in microwave processing. *Advances in Heat Transfer* 33 (1), pp. 1–94.
- Schiffmann, R. 2001. Microwave processes for the food industry. In: Datta, A., Anantheswaran, R. (Eds.), *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*. Marcel Dekker, New York, pp. 299–352.
- Schiffmann, R. F. 1995. Microwave and dielectric drying. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of industrial drying-1*. New York: Marcel Dekker. pp. 345–372.
- Schiffmann, R.F. 1992. Microwave technology in baking. In: *Advances in Baking Technology*. Chapman and Hall, Ltd., UK, pp. 293–315.
- Schwartz, S. J.; Von Elbe, J. H. 1983. Kinetics of chlorophyll degradation to pyropheophytin in vegetables. *Journal of Food Science* 48, pp. 1303-1306.
- Shazman A.; Mizrahi S.; Cogan U.; Shimoni E. 2007. Examining for possible non-thermal effects during heating in a microwave oven. *Food Chemistry* 103, pp. 444-453.
- Simal, S.; Femenia, A.; Garau, M.; Crosello, C. 2005. Use of exponential Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering* 66 (3), pp. 323-328.
- Singh, P.; Heldman, D. R. 1993. *Introduction to food engineering*. San Diego, CA: Academic Press.

Sjöholm, I.; Gekas, V. 1995. Apple shrinkage upon drying. *Journal of Food Engineering* 25 (1), pp. 123–130.

Smith, P. G. 2011. *Introduction to Food Process Engineering*. 2da ed. Food Science Text Series. Springer, pp. 510

Steet, J. A.; Tong, C. H. 1996. Degradation kinetics of green colour and chlorophylls in peas by colourimetry and HPLC. *Journal of Food Science* 61, pp. 924–927, 931.

Sumnu, G. 2001. A review on microwave baking of foods. *International Journal of Food Science and Technology* 36, pp. 117-127.

Suutarinen, J.; Honkapää, K.; Heiniö, R.; Autio, K.; Morkkila, M. 2000. *LWT-Food Sci Technol* 33, pp. 188–201. DOI 10.1006/fstl.2000.0638

Tang, J.; Wang, Y.; Chan, T.V.C.T. 2005. Radio-frequency heating in food processing. In: Barbosa-Canovas, G.V., Tapia, M.S., Cano, M.P. (Eds.), *Novel Food Processing Technologies*. CRC, New York, pp. 501–524.

Toğrul, I. T.; Pehlivan, D. 2003. Modeling of drying kinetics of simple apricot. *Journal of Food Engineering* 58 (1), pp. 23-32.

Turner, I. W. 1994. A study of the power density distribution generated during the combined microwave and convective drying of softwood. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Drying'94*. New York, USA: Marcel Dekker. pp. 89–111.

Uribe E.; Vega-Gálvez A.; Di Scala K.; Oyanadel R.; Saavedra T. J.; Miranda M. 2011. Characteristics of Convective Drying of Pepino Fruit (*Solanum muricatum* Ait.): Application of Weibull Distribution; *Food Bioprocess Technology* 4: pp. 1349-1356. DOI 10.1007/s11947-009-0230-y.

Van Dyke, D.; Wang, D. I. C.; Goldblith, S. A. 1969. Dielectric loss factor of reconstituted ground beef: The effect of chemical composition. *Food Technology*, 23, pp. 84-86.

Van Loock, W.M. 1997. Overview of microwave and high frequency energy for hazardous waste processing; MW: theory and application in material processing IV, in: D.E. Clark, W.H. Sulton, D.A. Lewis (Eds.), *First World Congress on MW Processing*, *Ceram. Trans.* 80, pp. 619-626.

Velizarov, S.; Raskmark, P.; Kwee, S. 1999. The effects of radiofrequency fields on cell proliferation are non-thermal. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 48(1), pp. 177–180.

Venkatesh, M.; Ragavan, G. 2004. An overview of microwave processing and dielectric properties of agrifood materials. *Biosystems Engineering* 88, pp. 1–18.

Verboven, P.; Datta, A. K.; Anh, N. T.; Scheerlinck, N.; Nicolaï, B. M. 2003. Computation of airflow effects on heat and mass transfer in a microwave oven. *Journal of Food Engineering* 59 (2-3), pp. 181-190.

Vicente, A.; Castro, I. 2007. Novel thermal processing technologies. In G. Tewari, V. Juneja (Eds.), *Advances in thermal and non-thermal food preservation*. Oxford, UK: Blackwell Publishing.

Wang, S.; Birla, S.L.; Tang, J.; Hansen, J.D. 2006. Postharvest treatment to control codling moth in fresh apples using water assisted radio frequency heating. *Postharvest Biology and Technology* 40, pp. 89-96.

Wang, S.; Tang, J.; Cavalieri, R.P.; Davis, D.C. 2003. Differential heating of insects in dried nuts and fruits associated with radio frequency and microwave treatments. *Transactions of the ASAE* 46 (4), pp. 1175–1182.

Wang, Z. H.; Chen, G. 1998. Heat and mass transfer during low intensity convection drying. *Chemical Engineering Science* 24 (17), pp. 3899-3908.

Weemaes, C. A.; Ooms, V.; Van Loey, A. M.; Hendrickx, M. E. 1999. Kinetics of chlorophyll degradation and colour loss in heated broccoli juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47, pp. 2404-2409.

Yang, H. W.; Gunasekaran, S. 2001. Temperature profiles in a cylindrical model food during pulsed microwave heating. *Journal of Food Science* 66 (7), pp. 998-1004.

Yang, H. W.; Gunasekaran, S. 2004. Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equations and Lambert's law during pulsed microwave heating. *Journal of Food Engineering* 64 (4), pp. 445-453.

Yongsawatdigul, J.; Gunasekaran, S. 1996. Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation* 20, pp. 145-156.

Zhang, L.; Lyng, J. G.; Brunton, N. P. 2007. The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave or radio frequency heating. *Journal of Food Engineering* 80 (1), pp. 142-151.

Zhang, M.; Tang, J.; Mujumdar, A.; Wang, S. 2006. Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology* 17, pp. 524–534.

Zheng, M.; Huang, Y. W.; Nelson, S. O.; Bartley, P. G.; Gates, K. W. 1998. Dielectric properties and thermal conductivity of marinated shrimp and channel catfish. *Journal of Food Science* 63, pp. 668-672.

Zheng-Wei, C.; Shi-Ying, X.; Da-Wen, S. 2004. Microwave–vacuum drying kinetics of carrot slices; *Journal of Food Engineering* 65 (2), pp. 157-164.

Zong, L.; Zhou, S.; Sgriccia, N.; Hawley, M.C.; Kempel, L.C. 2003. A review of microwave-assisted polymer chemistry (MAPC), *J. Microw. Power Electromagn. Energy* 38 (1), pp. 49-74.

Referencias Electrónicas.

[1]<http://w4.siap.sagarpa.gob.mx/AppEstado/monografias/Frutas/Fresa.html>.
08/04/2012.

[2]http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Publicaciones/SistemaProducto/Lists/Fresa/Attachments/2/pr_qto.pdf. 08/04/2012.

[3]http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/FRESA.pdf. 09/04/2012.