

EFFECTOS DE DIFERENTES TRATAMIENTOS DE CALENTAMIENTO POR
RADIO FRECUENCIA EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y LAS
PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL PURÉ DE MANZANA

DIANA LEONOR VÁSQUEZ MONTAÑO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL
POPAYÁN
2002

EFFECTOS DE DIFERENTES TRATAMIENTOS DE CALENTAMIENTO POR
RADIO FRECUENCIA EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y LAS
PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL PURÉ DE MANZANA

DIANA L. VÁSQUEZ M.

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera Agroindustrial

Director

Ingeniero VIJAYA RAGHAVAN, Ph. D.
Departamento de Ingeniería Agronómica y de Biosistemas
Macdonald Campus - McGill University
Ste-Anne de Bellevue, QC, Canada

Asesora

Ingeniera CLARA LUZ FORERO G., M. Sc.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL
POPAYÁN
2002

Nota de aceptación

Decano

Secretario académico

Jefe de Departamento

Coordinador de Programa

Coordinador de Pasantías

Presidente del jurado

Jurado

Popayán, 18 de julio de 2002

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Dios por haberme permitido tener esta experiencia de formación profesional y crecimiento personal.

A mis padres por todo su esfuerzo, apoyo y cariño.

A mi hermana por su incondicional colaboración.

A mi abuelo por el gran amor y soporte que siempre me brindo.

A mi hijo, quien fue mi fuerza y motivación durante todo este tiempo.

Al Dr. Raghavan, jefe de departamento de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas de la Universidad de McGill, Canadá por la confianza, apoyo y amistad brindada durante el desarrollo de la pasantía.

A la Dra. Valerie Orsat por su ayuda y soporte durante el uso de la tecnología de calentamiento por radio frecuencia.

Al Dr. Nghadi por facilitar el uso de equipos empleados para la determinación de las propiedades reológicas.

Al Dr. Lamin Kassama por sus discusiones, soporte y apoyo en el estudio de las propiedades reológicas.

A todas las personas del laboratorio de postcosecha y del departamento Ingeniería Agrícola y de Biosistemas de la Universidad de McGill - Canadá, quienes propiciaron un ambiente agradable para el desarrollo de esta pasantía.

A El Dr. Jorge Alberto Duque, Secretario General de la Universidad del Cauca, por sus palabras, amistad y colaboración para que esta pasantía pudiese ser una realidad.

A la profesora Magíster Clara Luz Forero por su colaboración, apoyo y valiosos aportes.

A la facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca, por su colaboración y confianza durante la elaboración de este trabajo.

A todos mis amigos, por su cariño y apoyo incondicional.

CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 PROPIEDADES DE LOS ALIMENTOS	6
2.1.1 Propiedades Reológicas	7
2.1.2 Propiedades termofísicas	9
2.1.3 Propiedades eléctricas	11
2.2 TECNOLOGÍA DE CALENTAMIENTO POR RADIO FRECUENCIA	13
2.2.1 Calentamiento dieléctrico	14
2.2.2 Ventajas del calentamiento por radiofrecuencia y microondas	16
2.2.3 Aplicaciones del calentamiento por radio frecuencia en la industria de alimentos	18
3. TRATAMIENTOS CON RADIO FRECUENCIA EN PURE DE MANZANAS	24
3.1 INTRODUCCIÓN	24
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.4 CONCLUSIONES	36
BIBLIOGRAFÍA	37
ANEXOS	42

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A. Cuadro 1. Bandas de frecuencias electromagnéticas empleadas para calentamiento. 43
- ANEXO B. Cuadro 2. Datos de las propiedades reológicas, sólidos solubles y contenido de humedad del puré de manzana después de la aplicación de diferentes tratamientos con calentamiento por radiofrecuencia. 44
- ANEXO C. Cuadro 3. Media de los datos obtenidos para los diferentes valores de “yield stress”, viscosidad, “rate index” y contenido de humedad del puré de manzanas para los diferentes niveles de energía empleados. 45
- ANEXO D. Cuadro 4. Media de los datos obtenidos para los diferentes valores de “yield stress”, viscosidad, “rate index” y contenido de humedad del puré de manzanas para las diferentes intervalos de tiempo empleados. 45
- ANEXO E. Cuadro 5. Análisis de varianza (ANAVA) de los datos obtenidos para los valores del contenido de humedad de los diferentes tratamientos aplicados al puré de manzana. 46
- ANEXO F. Cuadro 6. Análisis de varianza (ANAVA) de los valores obtenidos para la viscosidad de los diferentes tratamientos aplicados al puré de manzana. 46
- ANEXO G. Cuadro 7. Análisis de varianza (ANAVA) de los valores obtenidos para el “yield stress” de los diferentes tratamientos aplicados al puré de manzana. 47
- ANEXO H. Cuadro 8. Análisis de varianza (ANAVA) de los valores obtenidos para el “rate index” de los diferentes tratamientos aplicados al puré de manzana. 47

ANEXO I. Figura 1. Aplicador simple de radiofrecuencia.	48
ANEXO J. Figura 2. Equipo de radiofrecuencia.	48
ANEXO K. Figura 3. Incremento de la temperatura del puré de manzana con los diferentes tratamientos de calentamiento por radio frecuencia.	49
ANEXO L. Figura 4 propiedades reológicas de las dos muestras testigos (sin tratar) de puré de manzanas.	50
ANEXO M. Figura 5. vista esquemática del aplicador de dos platos paralelos empleado en este estudio.	52

RESUMEN

La tecnología de calentamiento por radiofrecuencia ha sido empleada desde hace muchos años por la industria de alimentos. El objetivo principal de este trabajo fue determinar los efectos que tienen diferentes tratamientos del calentamiento por radiofrecuencia en el procesamiento del puré de manzanas. Los parámetros observados fueron el contenido de humedad, los sólidos solubles y las propiedades reológicas de este producto. Los tratamientos fueron aplicados en un operador de plato paralelo que operara a una frecuencia de 27 MHz. Las muestras fueron tratadas a niveles de energía de 100 W, 150W, 200W, 250W y 300W y a diferentes tiempos (60, 120, 180, 240 y 300 segundos, s, respectivamente). Los resultados mostraron que el calentamiento por radiofrecuencia podría emplearse positivamente en el procesamiento del puré de manzanas sin tener algún efecto significativo en su contenido de humedad y sólidos solubles. La viscosidad incremento con el tiempo y niveles de energía respectivamente. Los valores del índice de comportamiento de flujo (n) para todos los diferentes tratamientos estuvieron entre 0.28-0.31, lo cual indicó que el producto es un fluido dependiente del tiempo y thixotrópico. Varios factores afectaron las lecturas del contenido de humedad y las propiedades reológicas del puré de manzanas, especialmente los valores de "yield stress", lo cual ocasionó algunas variaciones no esperadas en los resultados obtenidos. Se requiere de mas estudios similares con el fin de ampliar las aplicaciones de esta tecnología en el procesamiento de alimentos, especialmente en productos semisólidos con alto contenido de humedad.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la demanda de mercado de frutas y vegetales procesados y mínimamente procesados se ha incrementado considerablemente. Los consumidores están demandando productos más frescos por la potencialidad que estos tienen para mejorar su salud. Además, se encuentran interesados en el consumo de productos más sanos e inocuos. Por estas razones la industria de alimentos ha comenzado a desarrollar y mejorar nuevas tecnologías en el procesamiento de alimentos que contribuyan a alcanzar estos nuevos requerimientos

Estas tecnologías mejoradas para la preservación de alimentos están siendo empleadas para minimizar las pérdidas de color, sabor, textura y valor nutricional causadas por los tratamientos a los que son sometidos los alimentos durante su procesamiento. Al mismo tiempo, estas técnicas están orientadas a incrementar su vida en anaquel al tiempo que mantienen su calidad y frescura inicial. Los nuevos desarrollos para preservación de alimentos involucran la disminución de la actividad de agua A_w (por medio de secado o inmersión en soluciones de diferente concentraciones), tratamientos térmicos moderados (escaldado, envasado en caliente, calentamiento omhíco, calentamiento por alta frecuencia y calentamiento por microondas), métodos de procesamiento no térmico (tratamiento de alta presión, campos de alta frecuencia eléctrica), empaques activos y sistemas de control biológico (Alzamora *et al*, 1997).

Las frutas, un producto con una gran variedad de usos en la industria de alimentos, pueden ser consumidas en fresco o procesadas en forma de jugos, purés, vinos, cidras, frutos secos y mermeladas. Para preservarlas, éstas pueden ser también

enlatadas o congeladas. Hasta el momento, las frutas se han venido procesando usando métodos convencionales de calentamiento (agua caliente, aire caliente, vapor caliente, etc.). Sin embargo, estos métodos requieren que la energía térmica sea generada externamente y luego sea transferida al producto, lo cual presenta la desventaja de tener tasas lentas de transferencia de calor. Esto último conduce a prolongar el tiempo de procesamiento y consecuentemente a afectar negativamente la calidad del producto. Es por esta razón que los tratamientos moderados, especialmente tratamientos de calentamiento por alta frecuencia, han llegado a ser una importante alternativa para el procesamiento mínimo de frutas y hortalizas. Estos tratamientos no solo ofrecen la ventaja de reducir o eliminar posibles patógenos, sino también, de conservar la calidad del producto.

La aplicación de tratamientos térmicos en el procesamiento de alimentos, principalmente en la industria de frutas y vegetales, tiene muchos aspectos que deben ser considerados. Un aspecto muy importante que debe ser tomado en cuenta son las propiedades físicas de estos productos alimenticios. Estas propiedades juegan un papel importante en el diseño del sistema de procesamiento (Lozano y Urbicain, 1997). Las propiedades reológicas, termo físicas y eléctricas son algunas de las más importantes.

El presente trabajo se realizó con el fin de evaluar los posibles cambios en las propiedades físicas del puré de manzanas ocasionados por la aplicación de tratamientos de calentamiento por alta frecuencia. El puré de manzanas fue tratado con calentamiento por radiofrecuencia a diferentes niveles de energía y a diferentes tiempos. A todas las muestras se les evaluaron parámetros como la textura, las propiedades reológicas (viscosidad, índice de comportamiento de flujo (n), “yield stress”), sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix), contenido de humedad y apariencia general del producto.

Inicialmente, el trabajo presenta una corta revisión bibliográfica sobre la tecnología de calentamiento por radiofrecuencia y sus aplicaciones en la industria de alimentos. Posteriormente, se mencionan brevemente algunos aspectos alimentarios importantes que deben ser tomados en cuenta en la aplicación de esta tecnología. Finalmente, se presenta el desarrollo de este trabajo.

La investigación concerniente a las manzanas es de gran importancia en Canadá con el objetivo de mejorar el procesamiento y la calidad de este producto. Las manzanas son el cultivo de frutas más importante en este país por lo cual constituyen un producto de gran importancia y potencial para la industria canadiense de alimentos. La producción de manzanas en el año 2000 fue alrededor de 542.859 toneladas y su valor comercial fue estimado en 286 millones de dólares canadienses durante el mismo año. Los embarques de manzanas frescas correspondieron a los dos tercios de las ventas totales de manzanas y el resto se destinó a los mercados de procesamiento. De estas últimas, entre un 70 y 80% son transformadas en jugo y la cantidad restante es destinada para purés, trozos congelados y salsas para rellenar “pies” (Agriculture and Agri-Food Canadá, 2001).

El calentamiento por radiofrecuencia fue escogido para este estudio puesto que es un método que puede ser aplicado al procesamiento mínimo de alimentos. Secamiento, horneado, pasteurización, esterilización y descongelamiento son algunas de las aplicaciones actuales que tiene el calentamiento por radiofrecuencia en la industria de alimentos (Zhang, 2000). Sin embargo, han sido muy pocos los desarrollos que se han llevado a cabo en el campo del procesamiento de frutas y vegetales con el uso de esta nueva tecnología, la cual ofrece importantes ventajas en comparación con otros métodos convencionales. El calentamiento por radiofrecuencia es uniforme a través de todo el material (Kinn, 1947) y el tiempo de procesamiento se reduce considerablemente, lo cual ayuda a mantener la calidad del producto durante y después del procesamiento.

II. REVISION BIBLIOGRÁFICA

Durante los últimos años, los consumidores han empezado a demandar más alimentos procesados y mínimamente procesados (frutas y vegetales en particular) de apariencia cada vez más fresca y sana. Actualmente, este tipo de productos ha llegado a ser un tema común y muy importante en la industria de alimentos y en la terminología de muchos de los consumidores (Mertens y Knorr, 1992).

La definición de alimentos mínimamente procesados, MPF, (minimally processed food) incluye productos que contienen tejidos vivos y aquellos que han tenido leves modificaciones, pero que a su vez han conservado su calidad y sus características similares a aquellas de los productos en fresco (Wiley, 1994). Las principales investigaciones realizadas en MPF durante los últimos 10 años han sido desarrolladas especialmente en el campo de las frutas y los vegetales (Welti *et al*, 2000).

Hoy en día las frutas son objeto de calentamiento durante un gran número de procesos tales como cocción simple, envasado, enlatado, procesamiento de mermeladas purés y jugos, entre muchos otros, dentro del amplio sector de la industria de alimentos. Sin embargo, debido a la fragilidad de sus células, componentes sensibles del aroma y pigmentos inestables, el calentamiento puede conducir a profundos cambios (algunas veces negativos) en color, textura, sabor y valor nutricional de estos productos (Holdsworth, 1979).

En métodos convencionales de calentamiento de alimentos, la energía térmica se genera externamente y luego se transfiere a los alimentos de diferentes maneras (convención, conducción o radiación). En el caso de productos con partículas, esta energía se requiere en grandes cantidades con el fin de alcanzar un incremento

significativo de la temperatura y lograr así una adecuada cocción y esterilización de estos productos. Esta situación algunas veces contribuye a la degradación de las capas superficiales de los productos y por lo tanto a afectar la calidad de estos (Zhao, 2000). Estos problemas han llevado a que la industria de alimentos comience a desarrollar y emplear nuevas tecnologías que no sólo ayuden a proteger los atributos de calidad de los productos alimenticios, sino que también aseguren la producción de alimentos más seguros e inocuos para el consumidor.

Entre los métodos más recientes para el procesamiento y almacenamiento de frutas y vegetales y que ayudan a mantener su frescura, se encuentran los empaques en atmósfera modificada, empaques activos, alta presión hidrostática, calentamiento óhmico, campos de alta frecuencia eléctrica, calentamiento por radiofrecuencia, microondas, radiación y el empleo de enzimas y antimicrobianos naturales. (Hoover, 1997).

La tecnología del calentamiento por radiofrecuencia, uno de estos nuevos métodos mencionados anteriormente, ha mostrado tener un buen potencial en la industria de alimentos por proveer un calentamiento mas rápido, directo y uniforme en alimentos preempacados (Wang *et al*, 2001). Es por esta razón que ha llegado a ser muy importante el desarrollo de nuevos tratamientos para el procesamiento de alimentos que permitan extender el uso de esta tecnología.

2.1. Propiedades de los Alimentos

El procesamiento de alimentos involucra un amplio rango de tecnologías y métodos para preservar y/o transformar los productos desde el sitio de producción agrícola hasta el consumidor. Muchos de estos procedimientos alimentarios afectan las propiedades físicas de los alimentos y cambian su frescura y características naturales.

La importancia de cómo estas propiedades pueden cambiarse y también cómo pueden controlarse durante el procesamiento de alimentos son parámetros de gran importancia que la industria de alimentos debe tomar en consideración. Esto último garantizará no sólo el ofrecimiento de alimentos mejores y más seguros, sino también una mayor satisfacción de los requerimientos generales de los consumidores y una mayor optimización de las materias primas y condiciones de los procesos. Las propiedades reológicas, termo físicas y eléctricas son propiedades físicas muy importantes en los productos alimenticios

2.1.1. Propiedades Reológicas

El estudio de las propiedades reológicas puede ser definido como la ciencia de la deformación y flujo de los cuerpos. El principal objetivo de la reología es la predicción del sistema de fuerza necesario para causar una deformación o flujo dados en un cuerpo, o contrariamente, la predicción de la deformación o flujo resultante de la aplicación de un sistema de fuerza dado a un cuerpo (Fredrickson, 1964).

La aplicación de fuerza a un sistema de fluidos resultará en un flujo, mientras que en sólidos esta fuerza resultará en una deformación. Definiciones de cantidades tales como “shear stress” o fuerza de cizalladura (fuerza por unidad de área, dada en pascales), “shear rate” o velocidad de cizalladura (gradiente de velocidad en un flujo de fluido con respecto a la distancia, dado en 1/segundos) “yield stress” (fuerza que debe ser aplicada a un material para que este empiece a fluir), etcétera, deben ser dadas para hacer una descripción adecuada de la cinemática de la deformación y flujo de los cuerpos (Lozano y Urbicain , 1997; Fredrickson, 1964).

La ciencia de la reología tiene muchas aplicaciones en los campos de la aceptabilidad, procesamiento y manejo de alimentos. El número de operaciones en el procesamiento de alimentos depende en gran parte de las propiedades reológicas del

producto durante la etapa intermedia de producción, ya que ésta tiene un gran efecto sobre la calidad del producto terminado.

La viscosimetría, especialmente la viscosimetría de fluidos no newtonianos, es un componente importante de la calidad de la mayoría de los alimentos líquidos y semilíquidos. En ingeniería de alimentos, la viscosimetría se aplica a la capacidad para mezclar y bombear este tipo de alimentos. La plasticidad, pseudoplasticidad y la propiedad de “shear thinning” son factores de calidad importantes en los alimentos. El estudio de estas propiedades es parte importante de la ciencia de la reología.

Una amplia variedad de alimentos tales como mantequilla, margarina, puré de manzanas, salsa de tomate, mayonesa y muchos pudines son fluidos plásticos y/o pseudoplásticos, en su naturaleza. Se requiere que este tipo de productos pueda extenderse y fluya fácilmente mediante una pequeña fuerza, pero que a su vez, puedan mantener su forma, cuando no son objeto de ninguna fuerza externa diferente a la gravedad. Todas estas propiedades están contempladas dentro del campo de la reología (Bourne, 1982).

La textura es una de los principales factores de calidad de los productos alimenticios y generalmente se encuentra asociada con las propiedades reológicas. Sin embargo, los parámetros reológicos no cubren todos los factores que constituyen la textura de los alimentos ya que ésta tiende a relacionarse con las respuestas de los sentidos tácticos al estímulo físico sobre el material, el cual resulta del contacto entre el cuerpo (boca, manos, etc.) y el producto alimenticio (Lozano y Urbicain, 1997).

De acuerdo con Bourne (1992), “Las propiedades de textura de los alimentos son el grupo de características físicas que sobresalen de los elementos estructurales de estos, que son apreciados al tacto, están relacionados con la deformación, desintegración y flujo bajo una fuerza y son medidos objetivamente por funciones de masa, tiempo y distancia”.

Entre los equipos empleados para medir estas propiedades reológicas y de textura se encuentran los viscosímetros, los reómetros y en algunos casos es empleado el Instron Universal Testing Machine. La medida o predicción tanto de la textura como de las propiedades reológicas de los alimentos, ha llegado a ser un factor muy importante en el diseño, operación y optimización de procesos, así como en el control de calidad de los productos alimenticios. Se han llevado a cabo diferentes estudios que han desarrollado este tema ampliamente (Lozano y Urbicain, 1997).

2.1.2. Propiedades Termofísicas

Las propiedades termofísicas son aquellas que controlan el transporte y/o almacenaje de la energía térmica, así como también las transformaciones que se llevan a cabo en un material dado, mediante la acción del calor. Generalmente, la conductividad térmica, la difusividad térmica, el calor específico y la densidad o la gravedad específica, son consideradas como propiedades termofísicas (Lozano y Urbicain, 1997).

El calor específico indica cuánto calor se requiere para cambiar la temperatura de un material en un intervalo dado. Este parámetro es frecuentemente despreciado por el investigador o el ingeniero que trabaja con el calentamiento electromagnético, quien enfoca su atención sobre las propiedades dieléctricas de los materiales con los cuales se encuentra trabajando (Schiffmann, 1995).

La entalpía puede ser considerada como el contenido de calor o nivel de energía de un material y la difusividad térmica definida como la capacidad de un material para conducir calor o su capacidad para almacenarlo (Sweat, 1995). La conductividad térmica de un material es una medida de su capacidad para conducir calor y frecuentemente juega un papel de menor importancia en el calentamiento

dieléctrico y por microondas en comparación con los métodos de calentamiento convencional. Esto se debe a que la rápida velocidad de calentamiento de los dos primeros reduce el tiempo en el cual la conductividad térmica puede ser efectiva. Sin embargo, hay algunos casos en los cuales esta propiedad podría tener un papel significativo (Schiffmann, 1995).

Todas estas propiedades termofísicas son dependientes de la temperatura, de la composición química y de la estructura física del producto. Debido a que la variabilidad es un fenómeno típico de todos los productos alimenticios y que su composición tiene efectos en el comportamiento de las propiedades térmicas, es importante para la industria de alimentos, conocer cómo estos parámetros cambian con el tiempo y la temperatura durante un proceso dado para cada material alimenticio.

El interés en las propiedades termofísicas de los alimentos es importante para predecir la capacidad de las tasas de transferencia de calor en los alimentos. El análisis de transferencia de calor en el calentamiento o el enfriamiento de productos alimenticios requiere valores constantes y uniformes de las propiedades térmicas. Es por esta razón que en el pasado se han llevado a cabo investigaciones en este campo, que buscan obtener información mas precisa y apropiada de estas propiedades (Sweat, 1995).

La medida y el conocimiento de las propiedades termofísicas son considerados importantes en el procesamiento de alimentos y principalmente en la aplicación de métodos convencionales de calentamiento más que en tratamientos de energía electromagnética. Estas propiedades contribuyen al diseño y aplicación de procesos de tratamientos térmicos y al control de calidad de todos los productos dentro de la industria de alimentos.

2.1.3. Propiedades Eléctricas

Las propiedades eléctricas de los productos alimenticios han sido generalmente de gran interés por dos razones principales. Una está relacionada con la posibilidad de usar las propiedades eléctricas como una medida para determinar el contenido de humedad u otro factor de calidad, y la otra, está asociada con la absorción de energía en el calentamiento de alta frecuencia dieléctrica o de aplicaciones de calentamiento con microondas, ampliamente empleadas en el procesamiento de alimentos (Nelson, 1973).

Las propiedades eléctricas más importantes en el procesamiento de alimentos por alta frecuencia son las propiedades dieléctricas (o permisividad eléctrica de los materiales) ya que éstas determinan el número de propiedades eléctricas relacionadas con la absorción de energía y su distribución dentro de un producto alimenticio (Mudgett, 1995).

Las propiedades dieléctricas están definidas en términos de constante dieléctrica (ϵ') y de factor de pérdida (ϵ''). La constante dieléctrica (ϵ') provee una medida de qué tan fácilmente la energía puede ser almacenada por el alimento, mientras que el factor de pérdida (ϵ'') es una medida de la facilidad con que la energía puede ser disipada en el alimento. Estas dos, junto con las propiedades térmicas, determinan que tan eficientemente un material alimenticio puede ser calentado por microondas o por radiofrecuencia.

El complejo relativo de permisividad está representado como $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, donde la parte real es ϵ' y la parte imaginaria es ϵ'' . La j denota el operador complejo y es equivalente a $\sqrt{-1}$. La relación de la pérdida dieléctrica/constante dieléctrica (ϵ''/ϵ') es denominada pérdida tangencial ($\tan \delta$), la cual está relacionada con la capacidad del material para generar calor (Mudgett, 1986).

Las propiedades dieléctricas de los materiales determinan en gran medida el comportamiento de estos cuando son objeto de campos de radiofrecuencia o microondas para propósitos de calentamiento o secado (Nelson, 1998).

La energía dieléctrica disipada por unidad de volumen en vatios por metro cúbico, puede ser expresada de la siguiente forma:

$$P = E^2 \sigma$$

$$\sigma = \omega \epsilon''$$

σ está dada en S/m (siemens/metro); ω es la frecuencia angular ($2\pi f$); f es la frecuencia del campo eléctrico aplicado y ϵ es la permisividad del espacio libre, 8.854×10^{-12} faradios/metro (F/m). De esta manera, la energía disipada se puede expresar de la siguiente manera:

$$P = 55.63 f E^2 \epsilon'' \times 10^{-12}$$

Donde E representa el valor de la intensidad del campo eléctrico expresada en voltios/metro (V/m), f es la frecuencia en Hertz (Hz) y ϵ'' es la parte imaginaria del complejo relativo de permisividad.

La tasa de incremento de temperatura, dT/dt dada en grados centígrados/segundo ($^{\circ}\text{C/s}$) en el material dieléctrico y causada por la conversión de energía del campo eléctrico en calor en el material es:

$$dT/dt = P/(c\rho)$$

Donde c es el calor específico del material en kilojulios/kilogramo.grado centígrado ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$), y ρ es su densidad en kilogramo/metro cúbico (kg/m^3) (Nelson, 1998).

Las propiedades dieléctricas de la mayoría de materiales varían ampliamente con diferentes factores. En alimentos líquidos y semilíquidos, estas propiedades dependen principalmente de la cantidad de agua en estos materiales (generalmente un factor dominante) sales y contenido de sólidos (Mudgett, 1994). Las propiedades dieléctricas también dependen de la frecuencia del campo eléctrico alterno aplicado, de la temperatura, la densidad y la estructura de los materiales. Estas propiedades también dependen de su composición química y especialmente de los momentos dipolares permanentes asociados con el agua y algunas otras moléculas que constituyen el material de interés (Nelson, 1996).

El estudio y comprensión de estas propiedades ha llegado a ser uno de los aspectos más importantes a tomar en consideración en las aplicaciones industriales (Metaxas, 1996). Muchos estudios han sido dirigidos durante los últimos años en alimentos y productos agrícolas con el objetivo de tener apropiada información sobre las propiedades dieléctricas (Funebo and Ohlsson, 1998). Estos datos son de gran interés para el diseño de equipos y la aplicación de calentamiento dieléctrico tanto por radiofrecuencia como por microondas.

2.2. Tecnología de Calentamiento por Radiofrecuencia

Aunque el proceso de calentamiento por radiofrecuencia ha sido conocido por muchas décadas, es sólo en los últimos años que éste ha llegado a ser aceptado como un suplemento y algunas veces como una alternativa frente al calentamiento convencional en algunas industrias (Jones, 1987). Actualmente las industrias de alimentos, plásticos, papel y productos de madera, textiles, cerámicas, cuero, química, farmacéutica y fibra de vidrio han empezado a introducir esta tecnología dentro de sus procesos.

2.2.1. Calentamiento Dieléctrico

El calentamiento dieléctrico es el calentamiento producido en un material aislante cuando se coloca en un campo eléctrico de alta frecuencia. El calor resulta de las pérdidas internas durante la inversión rápida de la polarización de las moléculas del material dieléctrico.

El término calentamiento dieléctrico puede ser aplicado generalmente a todas las frecuencias electromagnéticas a lo largo de todo el espectro infrarrojo. Las frecuencias más altas denominadas generalmente HF (altas frecuencias), los términos dieléctrica, radiofrecuencia, y calentamiento por radiofrecuencia son términos que frecuentemente se emplean de forma intercambiada. Sin embargo, generalmente se acepta que el calentamiento dieléctrico se emplea a frecuencias entre 1 y 100 MHz mientras que el calentamiento por microondas ocurre entre 300 MHz y 300 GHz (Schiffmann, 1995).

La International Telecommunication Unions (ITU), a la cual pertenecen suscritas la mayoría de las naciones, es la responsable de la localización de varias bandas de frecuencia del espectro electromagnético. La ITU ha establecido un número de bandas de frecuencia para usos industriales, científicos y médicos, con el objetivo de evitar la interferencia con las bandas usadas en comunicaciones. Las bandas de frecuencias actualmente usadas para los propósitos de calentamiento están relacionadas en el cuadro 1, anexo A.

El calentamiento por microondas y radiofrecuencia alude al empleo de ondas electromagnéticas de ciertas frecuencias para generar calor en un material (Metaxas, 1996). Ambas tecnologías no son formas de calor sino que son formas de energía que están manifestadas como calor a través de su interacción con materiales.

La teoría del calentamiento dieléctrico está basada principalmente en el mecanismo de rotación dipolar y conducción iónica (Schiffmann, 1995). En la rotación dipolar moléculas individuales, las cuales están generalmente en su forma dipolar natural, rotan para alinearse por sí mismas con el campo eléctrico. En el equipo de radiofrecuencia, la polaridad del campo eléctrico se invierte millones de veces por segundo, lo cual ocasiona que las moléculas individuales roten de esta misma forma. Este movimiento molecular causa fricciones que generan calor.

Por otra parte, en la conducción iónica, las partículas cargadas (iones) están siempre moviéndose hacia la carga opuesta del plato. De nuevo, debido a que la polaridad del campo eléctrico en el equipo de radiofrecuencia es invertida millones de veces por segundo, los iones dentro del material están constantemente en movimiento y colisionando con otras partículas. Estas colisiones causan fricciones que también crean calor dentro del material.

En un sistema de calentamiento por radiofrecuencia, el generador crea un campo eléctrico alterno entre dos electrodos. El material a calentar se coloca en medio de los electrodos y se convierte en el dieléctrico de un capacitor (Figura 1, anexo D). La energía alterna origina moléculas polares en el material y ellas mismas se orientan continuamente a la cara de polaridad en la misma forma en que se comporta una barra magnética dentro de un campo magnético alterno. La fricción resultante del movimiento molecular causa calentamiento rápido dentro de toda la masa del material. La cantidad de calor generado en el producto esta determinada por la frecuencia, el voltaje aplicado, las dimensiones del producto y el factor de pérdida dieléctrica del material.

Es importante diferenciar los sistemas de calentamiento por microondas de los de calentamiento por radiofrecuencia. La principal diferencia reside en la frecuencia empleada y en la tecnología. Los microondas usan frecuencias más altas que los sistemas de radiofrecuencia. A medida que aumenta la frecuencia, la longitud de onda

eléctrica se hace cada vez más corta. Esto crea un fenómeno en calentamiento conocido como profundidad de penetración o atenuación de la energía de calentamiento.

Para proveer diferentes tipos de calentamiento hay algunas diferencias fundamentales en el diseño del equipo. La radiofrecuencia es desarrollada entre electrodos, mientras en microondas, las ondas son propagadas y reflejadas bajo las leyes de la óptica. Para sistemas de HF generalmente se tiene un diseño discreto de un oscilador donde el producto a calentarse es el dieléctrico del tanque o el circuito de capacitancia resonante. En un sistema de microondas en cambio, debido a la longitud de onda corta, el oscilador entero está dentro del tubo del circuito del mismo y la energía es radiada desde una antena hasta la actual carga del producto (Peterson *et al*, 1985). La radiofrecuencia trabaja bien con grandes cantidades que tienen alta conductividad iónica, mientras que los microondas trabajan bien con pequeñas cantidades de una naturaleza dipolar (Orsat, 1999).

No se presentan problemas de profundidad de penetración con el calentamiento por radiofrecuencia, pero en cambio sí pueden llegar a presentarse con el empleo de microondas. Los sistemas de radiofrecuencia son inherentemente más sensibles a niveles de mayor contenido de humedad en productos procesados. El problema de generación armónica es también más problemático para los sistemas de radiofrecuencia como lo es el “arcing”, particularmente cuando se procesan materiales inflamables, ya que los campos eléctricos desarrollados en el aplicador son mucho más altos que los equivalentes en los sistemas de microondas (Metaxas, 1996).

2.2.2. Ventajas del Calentamiento por Radiofrecuencia y Microondas

De acuerdo con Schiffmann (1995), algunas de las principales ventajas del calentamiento dieléctrico y por microondas incluyen:

Calentamiento uniforme a través del material. El calentamiento por radiofrecuencia ocurre instantáneamente a través de las tres dimensiones de un material homogéneo. No se requiere un diferencial de temperatura para forzar el calor por conducción o convección, evitando de esta manera los grandes gradientes de temperatura que ocurren en sistemas de calentamiento convencional.

Eficiencia de la energía de conversión. En este tipo de calentamiento, la energía es acoplada directamente al material que se está calentando. Esta no es empleada para calentar el aire, las paredes del horno, el transportador u otros componentes. Esto puede conducir a ahorros significativos de energía. Además, la fuente de energía no se calienta y pueden hacerse ahorros por conceptos del enfriamiento del sistema.

Mejor y más rápido control del proceso. La naturaleza instantánea del encendido-apagado del calentamiento y la capacidad para cambiar su intensidad mediante el control de la energía que sale del generador significa rápido, eficiente y preciso control del calentamiento.

Mejoramiento de la calidad del producto. Se eliminan el sobrecalentamiento de la superficie y la subsecuente deterioración del producto, los cuales son comunes en métodos tradicionales de calentamiento.

Otras ventajas que se obtienen también mediante el empleo del calentamiento por radiofrecuencia son los bajos costos de mantenimiento, la eficiencia en remoción de bajos contenidos de humedad y la tasa de retorno de la inversión de dos a tres años, son algunas de ellas (Orsat, 1999). Sin embargo, los altos costos iniciales de capital (\$2000-5000/ kW capacidad), y el hecho de que todos los generadores y aplicadores requieren de mantenimiento y mano de obra capacitada (Orsat, 1999), dan a la tecnología de radiofrecuencia desventajas significativas para su uso regular en la industria.

2.2.3. Aplicaciones del calentamiento por radiofrecuencia en la industria de alimentos

En la industria de alimentos la tecnología del calentamiento por radiofrecuencia ha sido ampliamente investigada desde los años cuarenta (Kinn, 1947; Cathcart, 1947; Brown, 1947) y se están llevando a cabo investigaciones que muestran su gran potencial (Sandeep *et al*, 2000). Actualmente el calentamiento por radiofrecuencia se está usando en la industria en procesos de secamiento, horneado, pasteurización, esterilización y descongelación (Zhang, 2000).

La radiofrecuencia ha sido usada en la industria de alimentos principalmente en ciertas aplicaciones de secado. De hecho, en la industria de alimentos el calentamiento por radiofrecuencia es válido para el 95% de todas las aplicaciones de secado, el porcentaje restante se está calentando por microondas (Mermelstein, 1998). La aplicación más amplia está en el secado final o post-horneado de galletas y otros productos de cereales (Ohlsson, 1999). La importancia de este tecnología en este sector de la industria de alimentos radica en que el calentamiento por radiofrecuencia permite calentar los productos uniformemente y se elimina el fenómeno de “checking” causado por los diferenciales de humedad dentro del producto (Mermelstein, 1998).

La energía de radiofrecuencia ha mostrado tener importantes aplicaciones posibles para la solución de problemas agrícolas (Nelson, 1985). El calentamiento dieléctrico por radiofrecuencia ha mostrado ser útil en tratamientos contra ataques de insectos en varios productos, minimizando el impacto térmico negativo y mostrando muchos beneficios en comparación con otros métodos convencionales, como por ejemplo aire caliente o agua caliente (Tang *et al*, 2000; Wang *et al*, 2000; Ikediala *et al*, 2002).

El interés en la posibilidad de controlar insectos con energía eléctrica de alta frecuencia se conoce desde los años setenta. Esto comenzó con la preocupación por los peligros en la salud causados por pesticidas químicos, situación que estimuló posteriores estudios de los posibles usos de radiofrecuencia y microondas para controlar insectos en granos y otros productos almacenados (Nelson, 1996).

Tang *et al* (2000) llevaron a cabo una revisión del calentamiento por radiofrecuencia como una alternativa en métodos de cuarentena empleando altas temperaturas y cortos tiempos de cuarentena. El estudio desarrollado demostró la efectividad de usar calentamiento por radiofrecuencia como tratamiento para controlar larvas de la polilla “codling” en conchas de nueces mediante la reducción del impacto térmico negativo sobre la calidad, generado por calentamiento con métodos convencionales.

Otro estudio similar fue desarrollado por Tang *et al* (2001) quien infestó conchas de nueces ‘Diamond’ con larvas de la polilla *Cydia Pomonella* en el tercero y cuarto instares, con el fin de determinar el efecto del tratamiento por radiofrecuencia en la mortalidad de insectos y la calidad de las nueces. Después de dos y tres minutos de tratamiento, la mortalidad de los insectos alcanzó el 78,65 y 100% respectivamente y el producto no mostró cambios estadísticamente significativos en el valor de peróxidos y ácidos grasos. Por lo tanto, este estudio ayudó a comprobar que los tratamientos por radiofrecuencia son un efectivo y rápido protocolo seguro de cuarentena en contra de las larvas de polilla “codling” en nueces, como una alternativa frente a otros tratamientos químicos como la fumigación con bromuro de metilo (Tang *et al*, 2001).

Adicionalmente se han desarrollado otras técnicas en procesos de poscosecha en contra de insectos plagas para mejorar la efectividad de los tratamientos por radiofrecuencia. Una técnica de inmersión en agua salina con energía de radiofrecuencia fue propuesta por Tang *et al* (2002) en contra de larvas de la polilla

“codling” en cerezas. Las cerezas fueron sumergidas en solución salina al 0.15% y tratadas con radiofrecuencia por cerca de 7 a 10 minutos a 50 grados centígrados, con lo cual se alcanzó el 100% de la mortalidad de larvas de esta polilla. Las cerezas no presentaron ninguna disminución en sus atributos de calidad. Por lo tanto este estudio mostró que tratar frutas por radiofrecuencia en inmersión en agua de concentraciones determinadas de sal puede ser empleado para desarrollar métodos alternativos efectivos para cuarentena de frutas (Tang *et al* 2002).

Nelson (1982) también estudió el calentamiento dieléctrico para controlar insectos plagas. El trabajo fue llevado a cabo para controlar el gorgojo del pecan “Stuarts” en la corteza y nueces quebradas. El objetivo del experimento fue encontrar un tratamiento que pudiera asegurar que las larvas de gorgojos no sobrevivieran en conchas de nueces pecan. El estudio demostró que el incremento en la temperatura y en el tiempo de exposición de las nueces a la radiofrecuencia aumentan la mortalidad de la larva, siendo ésta total con un calentamiento dieléctrico a 40 MHz; lo cual redujo la viabilidad de los pecanes tratados en la germinación. El estudio demostró también que el contenido de humedad en los pecanes es un importante factor en la conductividad del calor. Las conchas de nueces de pecan de 6,1% de humedad requirieron 80 grados centígrados para completar el control de la larva, mientras que las que tenían 2,6% de humedad requirieron sólo 53 grados centígrados durante quince segundos de exposición (Nelson, 1982).

Una investigación conducida por Nelson (1976), estudió el uso de energía eléctrica por radiofrecuencia en semillas de alfalfa con el fin de disminuir el porcentaje de semillas duras (impermeables al agua) y por lo tanto incrementar su germinación. El grado de germinación aumenta en semillas duras y está altamente correlacionado con el contenido de humedad de acuerdo con este estudio. Cuando el contenido de humedad es bajo, el tratamiento por radiofrecuencia es más exitoso en reducir el porcentaje de semillas duras. Adicionalmente la temperatura final de la semilla se incrementa en la misma proporción en que el contenido de humedad

disminuye. Además, el tratamiento por radiofrecuencia para disminuir el contenido de semillas duras en alfalfa no reveló deterioro en la calidad de la semilla después de varios años de almacenamiento, lo cual es una ventaja del sistema de procesamiento de semillas por radiofrecuencia frente a procesos mecánicos de escarificación.

La radiofrecuencia ha sido estudiada también para su uso en procesos continuos de asepsia. Para procesamiento aséptico de alimentos que contienen partículas, Sandeep *et al* (2000) estudiaron el empleo de radiofrecuencia en un sistema de flujo continuo. La investigación propuso el estudio del calentamiento de líquidos y alimentos con partículas, por radiofrecuencia a 40.68 MHz y 30 kW en una unidad de flujo continuo, tomando en consideración el uso futuro promisorio de la radiofrecuencia como una opción de calentamiento en el procesamiento aséptico de alimentos con partículas. El proyecto consistió en un calentamiento continuo de agua fresca potable, la cual fue introducida en el reservorio y bombeada continuamente a través del sistema teniendo la unidad de radiofrecuencia encendida. En el caso de alimentos con partículas (papas y zanahorias), la solución portadora circuló a través del sistema.

Los resultados del calentamiento continuo por radiofrecuencia en agua fresca potable mostró solo una pequeña (no significativa) diferencia de temperatura en todas las tasas de flujo y rangos de tiempo usados. En el caso del calentamiento con radiofrecuencia en cubos de zanahoria, papas y pequeños trozos de zanahorias, el estudio mostró sólo un pequeño gradiente de temperatura dentro de la partícula” después de ser calentada. El estudio además mostró una alta profundidad de penetración de las ondas de radiofrecuencia, lo cual de acuerdo con los autores, muestra “una significativa mejoría en la uniformidad de los perfiles de temperatura dentro de las partículas y constituye una ventaja del calentamiento por radiofrecuencia sobre el calentamiento por microondas”. Sin embargo, debe hacerse más investigación

Se han hecho algunos estudios en la pasteurización de productos alimenticios con radio frecuencia. La pasteurización de jamones curados con este sistema ha sido estudiada con el objetivo de determinar su efectividad (Bengtsson *et al*, 1970; Orsat, 1999). El objetivo del estudio de Bengtsson fue encontrar si la reducción en pérdidas de jugo en el tiempo de tratamiento podría alcanzarse a través del uso de radiofrecuencia. Los estudios encontraron que el calentamiento por radiofrecuencia si puede ser útil en la pasteurización de jamones. El proceso no sólo ayuda a disminuir la carga bacteriana, y consecuentemente a incrementar la vida en almacenamiento del producto, sino también a mantenerlo en buenas condiciones de calidad. Dos libras de jamón se trataron a 60 y 2400 MHz, lo cual redujo el tiempo requerido para alcanzar la temperatura central, y de esta forma se disminuyeron sustancialmente las pérdidas de jugos con un mejoramiento en la calidad sensorial del producto. Sin embargo, los recuentos bacterianos de la superficie fueron más altos que en los controles, lo cual demostró que existe necesidad de una temperatura de superficie más alta durante el tratamiento térmico.

Orsat (1999) empleó un tratamiento de calentamiento por radiofrecuencia a 27.12 MHz para pasteurizar jamón. El tratamiento por radiofrecuencia consistió en diez minutos de tratamiento a 75 °C y 85 °C. Las muestras fueron empacadas al vacío en tres diferentes películas plásticas, selladas y almacenadas durante 28 días a 4 °C. El estudio mostró una reducción en el recuento bacteriano y en las pérdidas por goteo durante el almacenamiento y mantenimiento de la calidad.

Houben *et al* (1991) describieron un proceso de pasteurización para emulsiones de salchichas empleando calentamiento por radiofrecuencia. Las emulsiones de salchichas de varias formulaciones fueron pasadas a través de tubos hechos de diferentes materiales y fueron probadas en un calentamiento estacionario a 27MHz. Los resultados mostraron rápidas tasas de calentamiento comparadas con procesos convencionales. La emulsión de salchichas tuvo una buena apariencia sin pérdidas de humedad ni de grasa.

En el sector de frutas y hortalizas procesadas y mínimamente procesadas, no se ha realizado suficiente investigación. Orsat (2001) evaluó el potencial de un tratamiento térmico por radiofrecuencia para mejorar y prolongar el almacenamiento de trozos de zanahorias empacadas al vacío y almacenadas a 5 o 6 grados centígrados. El estudio mostró que es posible usar tratamientos por radiofrecuencia para reducir en algún grado su carga microbiana y minimizar los efectos negativos de tratamientos térmicos sobre la calidad sensorial del producto mínimamente procesado.

III. TRATAMIENTOS CON RADIOFRECUENCIA EN PURÉ DE MANZANAS

3.1 Introducción

La tendencia en el consumo de frutas y vegetales ha cambiado considerablemente durante los últimos años. Los consumidores desean frutas y hortalizas más frescas, listas para comer, procesadas y mínimamente procesadas. Las formas de tales productos varían ampliamente dependiendo de las características del producto crudo y de los modelos de consumo.

Los tratamientos térmicos en el procesamiento de frutas causan no sólo destrucción microbiana sino también degradación de los nutrientes y cambios en las características de frescura y calidad debido a las prolongadas exposiciones a altas temperaturas y al rompimiento del material celular. Textura, sabor, contenido de humedad, sólidos solubles, entre otras cualidades organolépticas son características importantes de las frutas procesadas y de las frutas mínimamente procesadas (Holdsworth, 1979).

El puré de manzanas es el principal producto de éstas, de valor comercial, en los mercados occidentales. En 1992, en los Estados Unidos, el 75% de las manzanas procesadas fue empleado para la elaboración de este producto (Root, 1996). En Canadá, el puré de manzana es también uno de los productos procesados más importantes de la inmensa industria de producción de manzanas. El principal efecto del calentamiento sobre la pulpa de manzana es el rompimiento de la integridad

estructural, generando una textura blanda y suave lo cual es una característica importante en el puré de manzanas comercial. La extensión de éste efecto depende mucho de la variedad y de las condiciones de crecimiento de las manzanas. El calentamiento también tiene efectos importantes en las pérdidas de humedad de las manzanas.

El uso de tecnologías emergentes ayuda a asegurar productos inocuos mientras que maximizan la calidad y minimizan toda clase de pérdidas en el procesamiento de alimentos. Este es el principal objetivo para procesadores de alimentos preservados por calor. Una de estas tecnologías emergentes es el calentamiento por radiofrecuencia. Esta técnica podría llegar a ser una importante y útil tecnología en el procesamiento industrial de frutas. Por esta razón se requiere más investigación en este campo.

Muchos estudios han sido llevados a cabo en el procesamiento de manzanas. Varios investigadores han estudiado los factores que afectan el rompimiento de las manzanas para obtener un puré de buena calidad (Holdsworth, 1979). Se han realizado estudios sobre el secamiento de manzanas (Tang, 1999) y se han determinado propiedades dieléctricas de algunas variedades (Ikediala *et al*, 2000; Funebo *et al*, 1999; Nelson, 1997) con el propósito de desarrollar futuras aplicaciones de métodos como microondas o calentamiento dieléctrico en el procesamiento o cocción de algunos productos agrícolas. El efecto de la firmeza de la fruta y los parámetros de procesamiento, de la distribución del tamaño de partícula en el puré de manzanas (Nogueira *et al*, 1985), propiedades reológicas y mecánicas de alimentos líquidos y semilíquidos (Dervisoglu y Kokin El, 1986), y efectos de la relación temperatura de escaldado/tiempo de escaldado sobre las propiedades reológicas del puré de manzana (Usiaket *et al*, 1995) son algunos de los estudios que han sido realizados sobre la reología del puré de manzanas. Sin embargo, existe escasa información publicada sobre los efectos del tratamiento por radio frecuencia sobre la calidad de las manzanas procesadas.

3.2. Materiales y Métodos

Ensayos de aplicación de calentamiento por radiofrecuencia fueron hechos a muestras de puré de manzanas con el fin de buscar características de buena calidad con el mínimo manejo mecánico de éstas durante su procesamiento. Todas las muestras fueron replicadas dos veces y los datos analizados estadísticamente empleando un programa SAS (Statistical Análisis System). Para todos los experimentos fueron observados los efectos sobre algunos parámetros de calidad del puré de manzanas tales como propiedades reológicas, contenido de humedad y sólidos solubles (°Brix).

Manzanas

La variedad de manzanas Cortland fue escogida entre las variedades McIntosh y Red Delicious debido a su baja tendencia al pardeamiento y por la buena textura que éstas proveen en la preparación del puré de manzanas. La variedad Cortland posee una pulpa blanca y jugosa y una piel fuerte coloreada de rojo y verde. Este es una buena variedad para consumo en fresco y, además, es ampliamente usada en puré de manzanas, “pies”, horneados, trozos congelados y salsas. Las manzanas de variedad Cortland fueron compradas en un supermercado local y se conservaron refrigeradas a cuatro grados centígrados aproximadamente por dos días. Las manzanas para el tratamiento con radiofrecuencia fueron cortadas en pequeños pedazos y picadas en un procesador hasta obtener un puré de textura uniforme. No se adicionó agua ni azúcar. Las muestras control del puré de manzanas fueron empleadas como punto de referencia para el estudio de los tratamientos con radiofrecuencia y se prepararon de la misma forma que las muestras tratadas.

Calentamiento por radiofrecuencia

El sistema de radiofrecuencia empleado fue el de dos láminas paralelas. El generador funciona a una frecuencia de 27MHz y la máxima energía que produce es de 600 W para un voltaje máximo aplicado de aproximadamente 5 kV.

El sistema del equipo de radiofrecuencia está compuesto por un generador de radiofrecuencia, un adaptador de impedancia, un regulador de impedancia, un regulador de voltaje y un sistema de registro y control de la información (Figura 2, anexo J). El generador de radiofrecuencia, manufacturado por SAIREM, es un circuito oscilador acoplado a una válvula de triodo, el cual es alimentado por una fuente de energía de alto voltaje (220V). El circuito oscilador produce las oscilaciones que son mantenidas por la válvula triodo. La energía de salida de este generador es indicada y ajustada por un potenciómetro ubicado en la cara frontal del generador

El adaptador de impedancia es también referido como la “matching box” o la “matching network”. Esta última actúa como un balanceador de la impedancia y está compuesto de dos capacitores, los cuales básicamente ayudan a asegurar que la máxima energía sea transferida del generador al material. El regulador de impedancia es el control eléctrico de la “matching box”. Este controla las variaciones del capacitor con el fin de mantener la impedancia del sistema a 50Ω . Este regulador de impedancia asegura que la energía reflejada se minimice y la energía transferida se maximice (Orsat, 1999).

El generador, el regulador de voltaje y el regulador de impedancia, están todos conectados al sistema de registro de datos, el cual recoge la información en miliamperios (mA) y en voltios (V). Estos datos son enviados al programa de recolección de datos el cual permite diferenciar los valores en el computador, el cual puede ser usado como un sistema de control de los tratamientos con radiofrecuencia.

Durante los tratamientos térmicos con radiofrecuencia 25 g de puré de manzanas se colocaron en una cápsula de porcelana entre los electrodos del aplicador. El nivel de energía fue aplicado en combinaciones alternas de 100, 150, 200, 250, hasta 300 W por intervalos de 60, 120, 180, 240 y 300 segundos para cada intensidad de energía. La temperatura interna alcanzada por el puré de manzanas con el tratamiento térmico fue medida con un sensor de temperatura insertado en el centro de la muestra, inmediatamente después de aplicar el tratamiento con radiofrecuencia. La temperatura fue medida con un sensor de fibra óptica (Nortech Inc.). La evolución y la distribución térmica de la temperatura durante los tratamientos con radiofrecuencia no pudo observarse debido al fenómeno de “arcing” y a que se quemaba el sensor de temperatura debido al excesivo calentamiento con radiofrecuencia.

Después de que el tratamiento de calor fue aplicado, las muestras se dividieron en diferentes fracciones. Una muestra de 10 g se empleó para medir el contenido de humedad y otra de 15 g se destinó para medir las propiedades reológicas y los sólidos solubles.

Medición de las propiedades reológicas

Para observar los posibles cambios en la textura del puré de manzanas después del tratamiento con radiofrecuencia se empleó un reómetro Advanced Rheometer AR 2000. La geometría empleada fue la de plato paralelo, que consiste en un cono superior rotatorio y un plato fijo en la parte inferior. Esta geometría permite medir efectivamente las propiedades reológicas del puré de manzanas, el cual contiene una gran cantidad de partículas. La muestra (10g de puré) fue colocada en el espacio establecido entre los dos platos paralelos. La temperatura del producto se mantuvo constante a 23 grados centígrados.

Los valores de “shear rate” empleados estuvieron en el rango de 0 a 1000 (1/s). El rango de “shear stress” estuvo entre 0 a 300 (Pa) y la viscosidad entre 0.1000 y 100 (Pa.s). El modelo empleado para analizar los datos reológicos fue el Herschel-Bulkley. Este modelo se escogió porque ha mostrado ser el más exitoso en la medida de las propiedades reológicas del puré de manzanas (viscosidad y “rate index”) en un amplio rango de “shear rate” (Dervisoglu and Kokini, 1986).

Determinación del contenido de humedad

Las muestras de 10 g de puré de manzanas se depositaron en un platillo desechable, de aluminio, y se colocaron en un horno convencional a una temperatura de 80 grados centígrados. El peso de las muestras se midió en una balanza gramera a diferentes intervalos hasta tener peso constante, labor que en algunos casos requirió 24 horas o más. El contenido de humedad en este trabajo se presenta en base húmeda, el cual es definido como el peso del agua de la muestra (peso inicial menos peso final) dividido por el peso inicial de la misma. Las medidas de contenido de humedad fueron replicadas dos veces para cada muestra, después de la aplicación del tratamiento de calentamiento por radiofrecuencia.

Determinación de sólidos solubles

Los sólidos solubles totales, los cuales están frecuentemente relacionados con los azúcares totales o dulzor de las frutas, fueron medidos con un refractómetro manual. Una pequeña muestra del puré de manzanas se depositó sobre la superficie del prisma del refractómetro para hacer las respectivas lecturas. El número de replicas hechas fue el mismo que se empleó para la determinación del contenido de humedad.

Análisis estadísticos

Para este estudio se empleó un diseño factorial. Se manejaron dos parámetros experimentales y sus niveles se describen de la siguiente manera: cinco niveles de energía por radiofrecuencia (100, 150, 200, 250 y 300 W) y cinco niveles de tiempo de exposición (60, 120, 180, 240 y 300) con tres réplicas para cada tratamiento. El análisis de varianza (ANAVA) y la comparación del promedio empleando una prueba múltiple de Duncan (DMRT) , se emplearon con un sistema de análisis estadístico (SAS v.8).

3.3. Resultados y Discusión

Tratamiento con radiofrecuencia

Las propiedades dieléctricas de los materiales alimenticios son un aspecto muy importante a tener en cuenta en la aplicación de calentamiento por radiofrecuencia. Esto se debe a que éstas afectan significativamente la interacción de la energía electromagnética con los materiales. Datos de las propiedades dieléctricas de frutas y hortalizas han sido ampliamente determinados a diferentes intervalos de frecuencia. Para manzanas, el valor del factor de pérdida dieléctrica a 44 MHz es de 65,4, y se ha mostrado que éste varía inversamente a la frecuencia (Nelson, 1973). Esto indica que el valor del factor de pérdida dieléctrica para manzanas a 27 MHz debe ser más alto que éste , lo cual significa que este producto tiene una importante capacidad para absorber la energía eléctrica y por lo tanto una alta capacidad para responder a la aplicación de tratamientos con radiofrecuencia.

Las propiedades dieléctricas de los materiales alimenticios están altamente correlacionadas con el contenido de humedad. Las moléculas polares en las frutas son altamente inertes a los campos electromagnéticos de alta frecuencia (Funebo and Ohlsson, 1998). Las manzanas generalmente tienen 82.4% de agua en la composición de su fracción comestible (Holdsworth, 1979), el cual corresponde a un alto porcentaje de agua que da como resultado la buena interacción de la radiofrecuencia con este producto, y por lo tanto favorece la eficiencia de este tratamiento. El porcentaje inicial de contenido de humedad para las muestras de puré de manzanas en este estudio, fue de 76%. La temperatura en el puré de manzanas se incrementó linealmente con el tiempo durante los tratamientos con radiofrecuencia y se alcanzaron altas temperaturas en cortos tiempos. El incremento de la energía de radiofrecuencia aplicada también influyó en el incremento de la tasa de calentamiento del producto. El corto tiempo de calentamiento alcanzado con radiofrecuencia permite una reducción significativa del impacto térmico sobre la calidad de la fruta, lo cual es una ventaja importante de esta tecnología sobre otros métodos convencionales. Sin embargo, un problema que se observó durante los tratamientos con radiofrecuencia fue la distribución irregular del agua en las muestras y la concentración de energía en las áreas con mayor contenido de ésta. Algunos vapores se condensaron en el plato del electrodo superior cuando se alcanzaron altas temperaturas en el producto, la energía no fue bien recibida, y hubo una alta ocurrencia de “arcing” y quemaduras en los bordes de la superficie del producto.

Otro efecto positivo que tuvo el tratamiento con radiofrecuencia en el puré de manzanas se manifestó en su coloración. El color inicial de la muestra era pardo oscuro. Ningún tratamiento o inhibidor se adicionó para evitar esta condición. El color pardo se debe a reacciones enzimáticas generadas por la oxidación de fenoles en presencia de oxígeno. El pH (5,0) del puré de manzanas usado en este experimento estaba dentro del rango de pH (4,0-7,0) óptimo para la polifenoloxidasas (término genérico para el grupo de enzimas que catalizan la oxidación de compuestos fenólicos para producir color pardo en frutas y hortalizas) (Laurila and Ahvenainen, 1998).

El color de las muestras presentó reducción del pardeamiento enzimático al alcanzar temperaturas cercanas a los 80°C. Esto puede ser atribuido a la inactivación parcial de las enzimas. Generalmente, es necesario someter las frutas a cocción a temperaturas en el rango de 93-95 °C durante cuatro o cinco minutos para ablandar el tejido de la fruta e inactivar esta polifenoloxidasas (Root, 1996).

Propiedades reológicas

Se observó una textura suave en todos los tratamientos con radiofrecuencia aplicados al puré de manzana. La intensidad del ablandamiento aumentó con el incremento del tiempo y energía de los tratamientos. La viscosidad también incrementó de la misma forma. Estos cambios fueron proporcionales al calentamiento del puré de manzana.

La textura de las manzanas está determinada normalmente por las interacciones de la pectina con hemicelulosa, pentosas y hexosas. Durante el tratamiento térmico hay pérdida de semipermeabilidad de las membranas celulares, y una solubilización y rompimiento de estas sustancias pécticas en la pulpa de la fruta, lo cual genera un ablandamiento del tejido e incremento de la viscosidad. El principal factor que parece afectar el rompimiento de la pulpa de manzana es el pH. El tejido de la planta se suaviza generalmente de manera considerable en el rango de pH entre 4,5 y 7,0'. Esto es causado por un incremento de las sustancias pécticas solubles generadas por la depolimerización de protopectinas hidrosolubles e hidrólisis de hemicelulosas, las cuales están unidas a las sustancias pécticas por enlaces de hidrógeno. Las manzanas con bajo contenido de ácidos no son apropiadas para la producción de purés ya que se produce una degradación insuficiente para la reducción necesaria de la elasticidad y adhesión celular (Holdsworth, 1979). Como se mencionó anteriormente, el pH promedio de las muestras de puré de manzana, empleadas en este estudio fue de 5,0.

La viscosidad del puré de manzanas aumentó con la temperatura, el tiempo y el nivel de energía (Cuadro 2, anexo B y figura 3, anexo K). La más alta viscosidad de este producto se observó con el nivel de energía de 300 W y un tiempo de 300 segundos, y la más baja se presentó a 100 W y a 100 segundos. Estos resultados coinciden con lo esperado. El cuadro 2, anexo B muestra que los niveles de energía 200 W y 250 W tienen el mismo efecto en la viscosidad del puré de manzanas y no fueron significativamente diferentes de los resultados obtenidos con 300 W, 150 W y 100 W. Los tiempos 300 s y 240 s mostraron tener un efecto más significativo en la viscosidad del puré de manzanas, en comparación con 180, 120 y 60 s respectivamente (Cuadro 4, anexo D).

El concepto comúnmente manejado de “yield stress” en un producto semilíquido es la fuerza necesaria para iniciar un flujo y es por lo tanto el punto inicial de la curva de flujo en el eje de la variable “shear stress”. Entre más consistente es un producto, mayor “yield stress” se presenta. El valor más alto de “yield stress” presentado en las muestras de puré de manzanas se obtuvo a 300 W, y el más bajo a 100 W, lo cual era esperado. Los tratamientos a 60, 120 y 180 s no mostraron diferencias significativas. Otra observación interesante en los resultados (Cuadro 3, anexo C) fue el comportamiento similar presentado por la viscosidad y el “yield stress” con respecto a los niveles de energía.

Los datos obtenidos para las propiedades reológicas del puré de manzanas no fueron presentados en el orden esperado y no estuvieron en concordancia con el orden respectivo del tiempo aplicado en cada tratamiento. Estas inconsistencias presentadas pueden ser atribuidas al modelo empleado para el análisis. Debió emplearse un modelo “Stress ramp” para medir el “yield stress” en cambio del de “two ramps”. La presencia de una gran cantidad de burbujas de aire dentro del puré de manzanas y la no uniforme distribución del tamaño de partícula pudieron ser otros factores que afectaron los resultados. La distribución del tamaño de partícula está influenciada por muchos factores; algunos de estos son principalmente la variedad de manzanas, el

grado de madurez de la fruta, los sistemas de almacenamiento y maduración, el nivel y duración del tratamiento térmico y el tipo de equipo usado (Mohr, 1973).

Los valores de “rate index” o índice de comportamiento de flujo (n) estuvieron entre 0.28 y 0.31 (Cuadro 1, anexo A). Los valores obtenidos indicaron que el puré de manzanas es un fluido “shear thinning” (thixotrópico) y que se encuentra lejos de ser un fluido Newtoniano, donde el valor de $n=1$. Los investigadores Qio y Rao (1988) encontraron que el valor de este índice en el puré de manzanas con adición de agua tenía valores entre 0.34-0.37. Estos valores son un poco mayores que los obtenidos en este experimento ya que las muestras no tuvieron ninguna adición de agua. Holdsworth (1971) también midió las propiedades reológicas del puré de manzanas con un contenido de 11° Brix de sólidos solubles a una temperatura de 30°C. Los valores de n encontrados por él a estas condiciones estuvieron alrededor de 0.34. Rao y Bourne (1977) también midieron este factor y encontraron que el valor de n para el puré de manzanas fue de 0.258.

Los diferentes niveles de energía aplicada a las muestras no mostraron tener ninguna diferencia significativa entre los diferentes valores obtenidos para cada una de ellas (Cuadro 3, anexo C). De otra parte, la variable tiempo sí mostró tener diferentes efectos sobre los valores obtenidos para este factor (Cuadro 4, anexo D).

Contenido de Humedad

El contenido de humedad en el puré de manzanas es un factor muy importante a tener en cuenta durante su producción. El contenido inicial de humedad promedio del puré de manzanas para este estudio fue de 76%. Este valor después de aplicar los tratamientos con radio frecuencia estuvo alrededor de 75 % (Cuadro 3, anexo C), con excepción del tratamiento con 300W a 300s, valor que presentó una notable reducción. Esto concordó con la alta condensación presentada en el plato superior del

aplicador del equipo de radiofrecuencia y con las altas temperaturas alcanzadas con este tratamiento (Figure 3, anexo K).

El promedio del contenido de humedad (Cuadro 3, anexo C) a diferentes niveles de energía mostró que los tratamientos por radiofrecuencia no tienen ningún efecto significativo en el contenido de humedad del puré de manzanas y muestra un efecto positivo en el procesamiento de este producto a nivel comercial. Sin embargo, los datos obtenidos para este parámetro entre un tratamiento y otro mostraron algunas variaciones que no se esperaban. El tratamiento a 150 W y 120 s mostró tener el efecto más bajo sobre el contenido de humedad. Las inconsistencias presentadas pueden ser explicadas debido a la imprecisión de la balanza empleada, a la naturaleza de la muestra y a la inadecuada distribución del agua en las muestras empleadas, relativamente pequeñas, para la aplicación del calentamiento por radiofrecuencia.

Sólidos Solubles

Los diferentes tratamientos con radiofrecuencia no tuvieron ningún efecto sobre los sólidos solubles del puré de manzana, los cuales eran inicialmente de 11°Brix y no presentaron ningún cambio en su valor después de la aplicación de los diferentes tratamientos (Cuadro 2, anexo B).

3.4. Conclusiones

Aunque se presentaron algunas variaciones entre los datos obtenidos, en general, el estudio demostró que la tecnología del calentamiento por radiofrecuencia puede ser empleada positivamente en el procesamiento del puré de manzanas. Sin embargo, existen otros aspectos que deben ser tomados en cuenta y se requiere más investigación para el procesamiento de productos semisólidos con alto contenido de humedad. Altas temperaturas en cortos tiempos fueron alcanzadas por el puré de manzanas con los diferentes tratamientos aplicados con radiofrecuencia y sin ninguna pérdida significativa en su contenido de agua. Sólo el nivel más alto de energía y el tiempo mas prolongado mostraron una notable reducción en su contenido de humedad. Cambios positivos en las propiedades reológicas de este producto se presentaron con la aplicación de los tratamientos con radiofrecuencia. La viscosidad y la textura suave del producto incrementaron con el tiempo y la intensidad de energía. Los niveles de energía de 250W y 300 W mostraron tener efectos similares sobre las diferentes propiedades físicas evaluadas. Este último es un aspecto importante a tener en cuenta en el diseño de estándares de producción. Los sólidos solubles del puré de manzanas permanecieron en un valor constante (11 °Brix) después de la aplicación de cada uno de los diferentes tratamientos con radiofrecuencia.

V. BIBLIOGRAFIA

- Agriculture and Agri-Food Canada. (2001). Canada's Fruit Industry.
- Barbosa-Canovas, G.V. and Peleg, M. (1983). Flow parameters of selected commercial semi-liquid food products. *Journal of food studies*. 14, 213-234.
- Bengtsson, N.E., W. Green, and F.R. Del Valle. (1970). Radio Frequency pasteurization of cured hams. *Journal of Food Science*, 35, 681-687.
- Bourne, M.C. (1982). Food Texture and Viscosity: Concept and measurement. Academic Press. New York.
- Catchcart, W.H., Parker, J.J., Beattie, H.G. (1947). The treatment of package bread with high frequency heat. *Journal Food Technology*, 1(2) 174-177.
- Dervisoglu, M.; Kokini, J.L. (1986). Steady shear rheology and fluid mechanics of four semisolid foods. *Journal of food science*. 51 (3), 541-546.
- Fredrickson, A.G. (1964). Principles and applications of rheology. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. N.J. U.S.A.
- Funebo, T.; Ohlsson, T. (1998). Dielectric properties of fruits and vegetables as a function of temperature and moisture content. *Journal of microwave and electromagnetic energy*. 34, 42-53.
- Godfrey Usiak, A.M.; Bourne, M.C.; Rao, M.A. (1995). Blanch temperature/time effects on rheological properties of applesauce. *Journal of food science*. 60 (6), 1289-1291.
- Holdsworth, S. D. (1979). *Fruits*. In Effects of heating in foodstuffs. Pp. 255-305. Applied Science Publishers. England.
- Hoover, D. (1997). Minimally Processed Fruit and Vegetables: Reducing microbial load by non-thermal physical treatments. *Journal Food technology*, 51, 66-69.

- Houben, J., Schoenmakers, L., van Putten, E., van Roon, P. and Krol, B. (1991). Radio Frequency pasteurization of sausage emulsions as a continuo process. *Journal of Microwave Power and Elec. Energy*, 26(4), 202-205.
- Ikediala, J., Hansen, J., Tang, J., Drake, S., Wang, S. (2002). Development of a saline water immersion technique with RF energy as a post-harvest treatment against codling moth in cherries. *Journal Post-harvest Biology and Technology*, 24, 25-37.
- Jones, P. (1987). Radio Frequency Processing in Europe. *Journal Microwave Power*, 22(3), 143-153.
- Kinn, T.P. (1947). Basic theory and limitations of high frequency heating equipment. *Journal Food Technology*, 1(2) 161-173.
- Laurila, E.; Kervinen, R.; Ahvenainen, R. (1998). *Post harvest News and Information*. 9 (4), 53-66.
- Lozano, J.E., Urbicain, M. (1997). Thermal and Rheological properties of foodstuffs. In *Handbook of Food Engineering Practice*. Pp. 425-486. CRC Press. New York.
- Mermelstein, N. (1998). Microwave and Radio Frequency Drying. *Journal Food Technology*. 52(11), 84-86.
- Mertens, B., Knorr, D. (1992). Developments of non-thermal processes for food preservation. *Journal Food Technology*, 46(5), 124-133.
- Metaxas, R. (1996). *Foundations of Electroheat: a unified approach*. Pp. John Wiley & Sons. Chichester, UK.
- Mudgett, R.E. (1986). Microwave properties and heating characteristics of foods. *Journal Food Technology* 43, 84-93.
- Mudgett, R.E. (1994). Electrical Properties of foods. In *Engineering properties of food*. Second Edition, M.A. Rao and S.S.H. Rizvi Editors. Marcel Dekker Inc. New York. Pp. 389-455.
- Nelson, S.O. (1973). Electrical properties of agricultural products. *Transaction ASAE* 16 (2), 384-400. St Joseph, Michigan.

- Nelson, S.O. (1976). Use of microwave and lower frequency RF energy for improving alfalfa seed germination. *Journal Microwave Power*. 11(3), 271-277.
- Nelson, S.O. (1982). RF dielectric heating for Pecan Weevil Control. *Transaction ASAE* 31, 456-458.
- Nelson, S.O. (1984). Review and assessment of Radio Frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Trans. of ASAE*. 39(4), 1475-1484.
- Nelson, S.O. (1985). RF and Microwave energy for potential agricultural applications. *Journal Microwave Power*. 20, 65-70.
- Nelson, S.O. (1996). Nondestructive radio frequency and microwave quality evaluation techniques for agricultural products and foods. In *Proceedings of the international symposium on quality evaluation of agricultural products and foods using nondestructive techniques*. Pp. 67-86. Seoul, Korea.
- Nelson, S.O. (1998). Dielectric properties measurements techniques and applications. In *Paper #983067. ASAE Annual International Meeting*, Orlando, Florida. USA Transactions ASAE.
- Nogueira, J.N.; McLellan, M.R.; Anantheswaran, R.C. (1985). Effect of fruit firmness and processing parameters on the particle size distribution in applesauce of two cultivars. *Journal of food science*. 50, 744-753.
- Ohlsson. T. (1999). Minimal processing of foods with electric heating methods. In *Processing Foods: Quality Optimization and Process Assessment*. Pp. 97-105. CRC Press. New York.
- Orsat, V., Bai, L., Raghavan, G. (1999). RF pasteurization of ham to enhance shelf life in vacuum packagin. In *ASAE Paper #99-6091*. St Joseph, Michigan.
- Orsat, V. (1999). Radio Frequency Thermal Treatments for Agri-food Products. Ph.D. Thesis, McGill University, Department of Agricultural and Biosystems Engineering.
- Orsat, V., Gariepy, Y., Raghavan, G., Lyew, D. (2001). Radio Frequency treatment for ready-to-eat fresh carrots. *Journal Food Research International*, 34, 527-536.

- Peterson, K.W., Burton J.R. and Annett D.A.(1985). Selected Applications in High Frequency and Microwave Heating – An Economic Commentary, in Radio frequency/Radiation and Plasma Processing. Industrial Applications and Advances. Edited by P.N. Cheremisinoff, O.G. Farah, R.P. Ouellette. Pp.31-42.
- Qiu, C.G. and Rao, M.A. (1988). Role of pulp content and particle size in yield stress of applesauce. *Journal of food science*. 51, 1165-1170.
- Root, W.H. (1996). Apple and apple processing. In Major processed Products. Edited by Somogyi, L.P.; Barret, D.M.; Hui, Y.H. Vol.(2).Technomic Publications. Pennsylvania, USA.
- Sandeep, K.P., Zhong, Q.(2000). Continuous flow Radio Frequency heating of liquid and particulate foods. In Paper #006103. *ASAE Annual International Meeting*, Milwaukee, WI, USA.
- Schiffmann, R.F. (1995). Microwave and dielectric heating. In Handbook of industrial drying. Edited by Mujumdar, A.S. Marcel Dekker, Inc. New York. Pp. 345-372.
- Sweat, V.E. (1994). Thermal Properties of foods. In Engineering properties of food. Second Edition, M.A. Rao and S.S.H. Rizvi Editors. Marcel Dekker Inc. New York. Pp. 99-167.
- Tang, J., Ikediala, J., Wang,S., Hansen, J., Cavalieri, R. (2000). High Temperature Short-Time Thermal Quarantine Methods. *Journal Post-harvest Biology and Technology*, 21, 129-145.
- Wang, S., Ikediala, J., Tang, J., Hansen, J., Mitcham, E., Rao, R., Swanson, B. (2001). Radio Frequency Treatments to control codling moth in in-shell walnuts. *Journal Post-harvest Biology and Technology*, 22, 29-38.
- Welti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F. and Lopez-Malo, A. (2000). Minimally Processed Foods State of the Art and Future. In Ortega-Rodriguez, E., Barbosa-Canovas, G.; Fito, P. *Food Engineering*. (Pp181-212). New York: Chapman and Hall.

- Wiley, R.C.; Binkley, C.R. (1989). Applesauce and other canned apple products. In *Processed apple products*. Edited by Downing, D. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Wiley, R.C. (1994). Introduction to minimally processed refrigerated fruits and vegetables. In Wiley R. C, *Minimally Processed Fruits and Vegetables*. Pp. 1-14. New York: Chapman and Hall.
- Zhao, Y. (2000). Using Capacitive (Radio Frequency) Dielectric Heating in Food Processing and Preservation. *Journal of Food Process Engineering*, 23, 25-55.

ANEXOS

ANEXO A

Cuadro 1. Bandas de frecuencias electromagnéticas empleadas para calentamiento

	Frequency
Radio	13.56 MHz \pm 6.68 kHz
	27.12 MHz \pm 160.00 kHz
	40.68 MHz \pm 20.00 kHz
Microwaves	915 MHz \pm 13 MHz
	2450 MHz \pm 50 MHz
	5800 MHz \pm 75 MHz
	24125 MHz \pm 125 MHz

ANEXO B

Cuadro 2. Cambios en algunas propiedades físicas del puré de manzana después de la aplicación de diferentes tratamientos con calentamiento por radiofrecuencia. *(Promedio de los datos obtenidos en dos réplicas)

Nivel de Energía (W)	Tiempo (s)	Yield Stress (Pa)	Viscosidad (Pa.s)	Rate Index (n)	Contenido de Humedad (%)	Sólido Soluble (°Brix)
100	60	17.225	12.47	0.34055	74.875	11
100	120	14.97	17.48	0.31825	76.64	11
100	180	8.388	21.17	0.29715	74.76	11
100	240	7.781	25.565	0.28455	74.825	11
100	300	7.5925	24.285	0.2945	75.57	11
150	60	7.4285	21.69	0.30255	74.77	11
150	120	10.655	22.94	0.3027	76.58	11
150	180	19.53	19.24	0.31505	74.685	11
150	240	17.875	20.525	0.31095	76.595	11
150	300	19.065	20.815	0.3114	76.525	11
200	60	13.325	24.21	0.29105	74.895	11
200	120	19.755	14.795	0.35315	75.085	11
200	180	18.605	16.085	0.3189	74.77	11
200	240	6.926	24.88	0.29915	76.4	11
200	300	13.1965	39.19	0.24905	76.25	11
250	60	9.8995	20.84	0.29895	75.61	11
250	120	12.7745	18.385	0.3094	76.4	11
250	480	19.159	21.565	0.30695	74.625	11
250	240	16.375	25.73	0.2923	75.385	11
250	300	18.625	28.49	0.27915	74.55	11
300	60	26.74	17	0.33755	76.28	11
300	120	9.01255	24.46	0.29095	75.36	11
300	180	5.975	28.48	0.27255	74.775	11
300	240	11.9935	28.91	0.2773	74.25	11
300	300	46.62	33.335	0.26715	72.015	11

ANEXO C

Cuadro 3. Media de los datos obtenidos para los diferentes valores de “yield stress”, viscosidad, “rate index” y contenido de humedad del puré de manzanas para los diferentes niveles de energía empleados.

Nivel de Energía (W)	Yield Stress (Pa)	Viscosidad (Pa.s)	Rate Index (n)	Contenido de Humedad (%)
100	11.191 ^b	20.194 ^b	0.307000 ^a	75.3340 ^a
150	14.911 ^b	21.042 ^b	0.308530 ^a	75.8310 ^a
200	14.362 ^{ab}	23.832 ^{ab}	0.302260 ^a	75.4800 ^a
250	15.367 ^{ab}	23.002 ^{ab}	0.297350 ^a	75.3140 ^a
300	20.068 ^a	26.437 ^a	0.289100 ^a	74.5360 ^a

* Valores de media con la misma letra y en la misma columna no son significativamente diferentes entre si.

ANEXO D

Cuadro 4. Media de los datos obtenidos para los diferentes valores de “yield stress”, viscosidad, “rate index” y contenido de humedad del puré de manzanas para las diferentes intervalos de tiempo empleados.

Nivel de Energía (W)	Yield Stress (Pa)	Viscosidad (Pa.s)	Rate Index (n)	Contenido de Humedad (%)
60	14.924 ^{ab}	19.242 ^c	0.314130 ^a	75.2860 ^{bc}
120	13.433 ^{ab}	19.612 ^c	0.314890 ^a	76.0130 ^a
180	14.331 ^{ab}	21.308 ^c	0.302120 ^{ab}	74.7230 ^c
240	12.190 ^b	25.122 ^b	0.292850 ^{bc}	75.4910 ^{ab}
300	21.020 ^a	29.223 ^a	0.280250 ^c	74.9820 ^{ab}

* Media con la misma letra y en la misma columna no son significativamente diferentes entre si.

ANEXO E

Cuadro 5. Análisis de varianza (ANAVA) de los datos obtenidos para los valores del contenido de humedad de los diferentes tratamientos aplicados al puré de manzana.

Fuente	GL	SS	MS	F Valor	Pr>F
Nivel de energía (PL)	4	8.99404000	2.24851000	5.27	0.0032
Tiempo	4	9.79094000	2.44773500	5.73	0.0020
PL* Tiempo	16	33.43492000	2.08968250	4.90	0.0002
Error	25	10.67075000	0.42683000		

ANEXO F

Cuadro 6. Análisis de varianza (ANAVA) de los valores obtenidos para la viscosidad de los diferentes tratamientos aplicados al puré de manzana

Fuente	GL	SS	MS	F Valor	Pr>F
Nivel de energía (PL)	4	241.6398720	60.4099680	4.48	0.0073
Tiempo	4	716.4397520	179.109938	13.27	<0.0001
PL* Tiempo	16	716.3543280	44.7721455	3.32	0.0036
Error	25	337.371450	13.494858		

ANEXO G

Cuadro 7. Análisis de varianza (ANAVA) de los valores obtenidos para el “yield stress” de los diferentes tratamientos aplicados al puré de manzana

Fuente	GL	SS	MS	F Valor	Pr>F
Nivel de energía (PL)	4	405.816084	101.454021	1.43	0.2532
Tiempo	4	468.792050	117.198013	1.65	0.1926
PL* Tiempo	16	2546.405830	159.150364	2.24	0.0340
Error	25	1773.460004	70.938400		

ANEXO H

Cuadro 8. Análisis de varianza (ANAVA) de los valores obtenidos para el “rate index” de los diferentes tratamientos aplicados al puré de manzana

Fuente	GL	SS	MS	F Valor	Pr>F
Nivel de energía (PL)	4	0.00249105	0.00062276	1.62	0.2001
Tiempo	4	0.00863453	0.00215863	5.62	0.0023
PL* Tiempo	16	0.01498857	0.00093679	2.44	0.0222
Error	25	0.00960399	0.00038416		

ANEXO I

FIGURA 1. APLICADOR SIMPLE DE RADIOFRECUENCIA

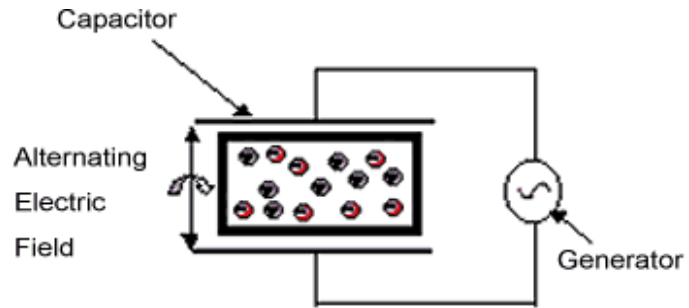
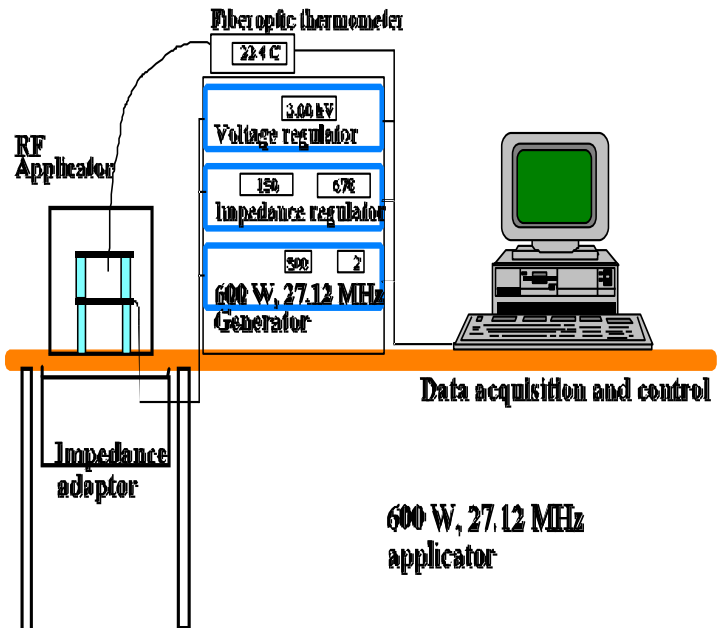


Figure 1. Simple RF Applicator

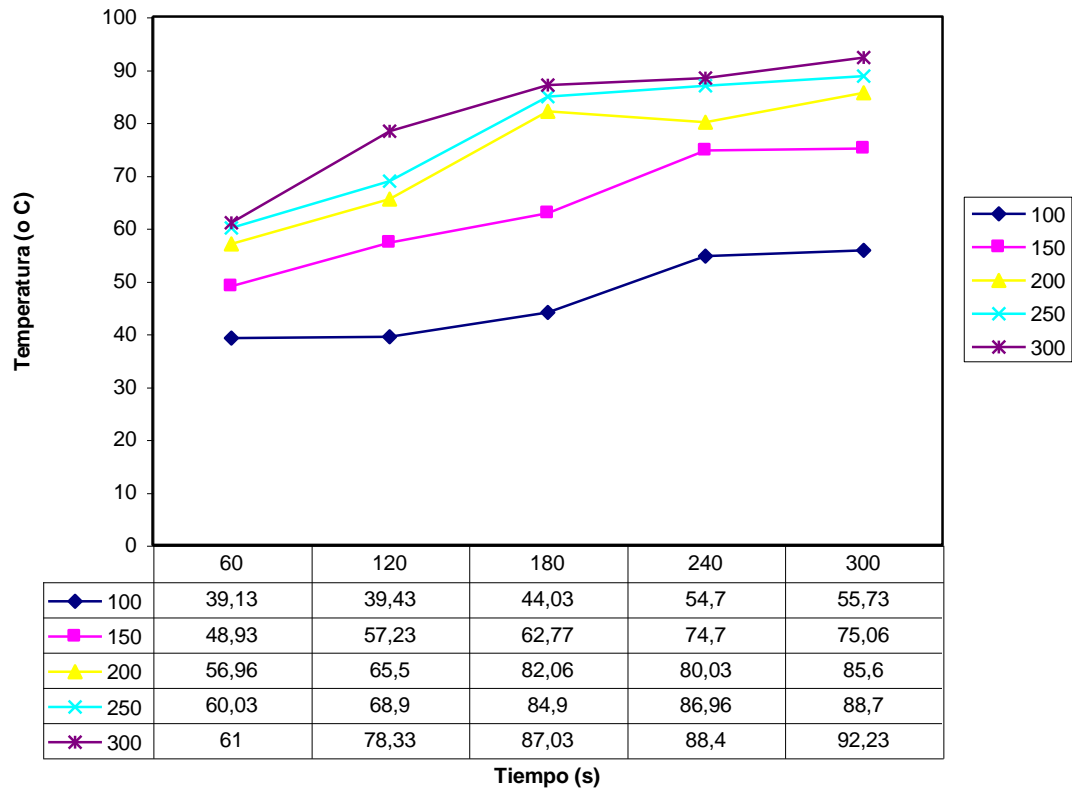
ANEXO J

FIGURA 2. EQUIPO DE RADIOFRECUENCIA



ANEXO K

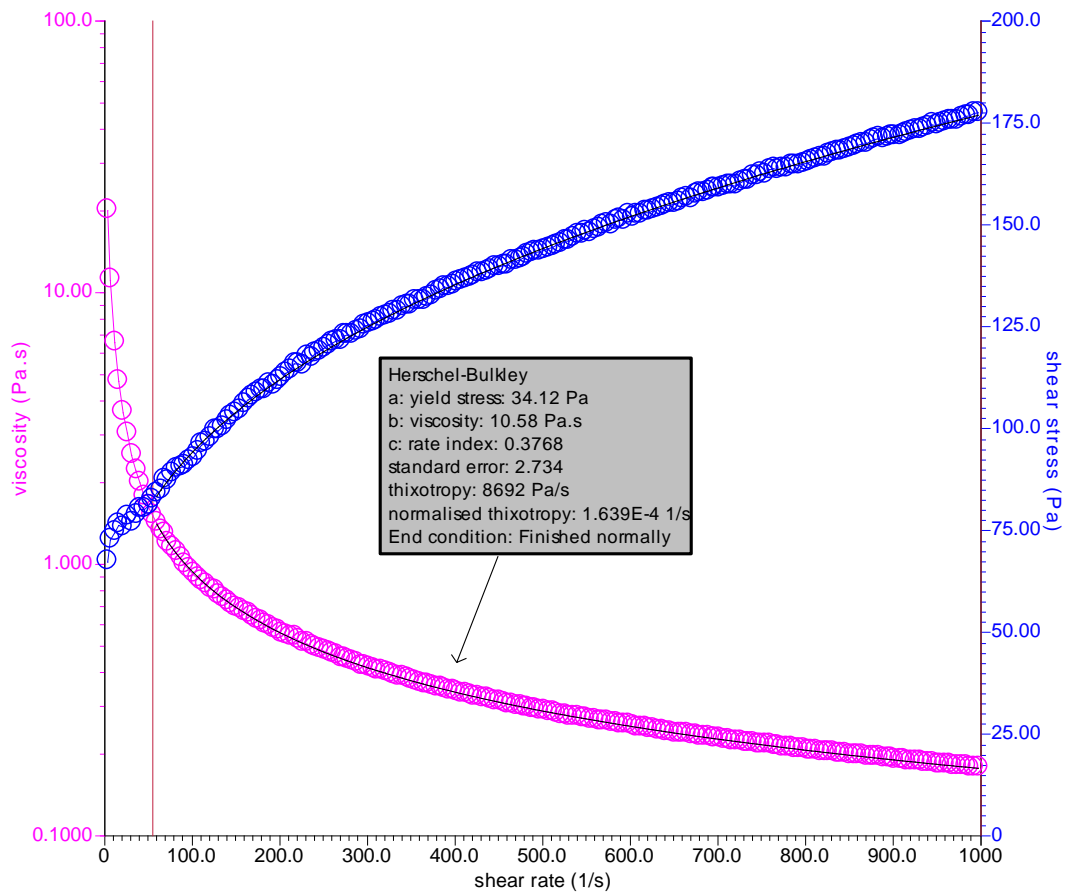
FIGURA 3. INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DEL PURÉ DE MANZANA CON LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DE CALENTAMIENTO POR RADIO FRECUENCIA



ANEXO L

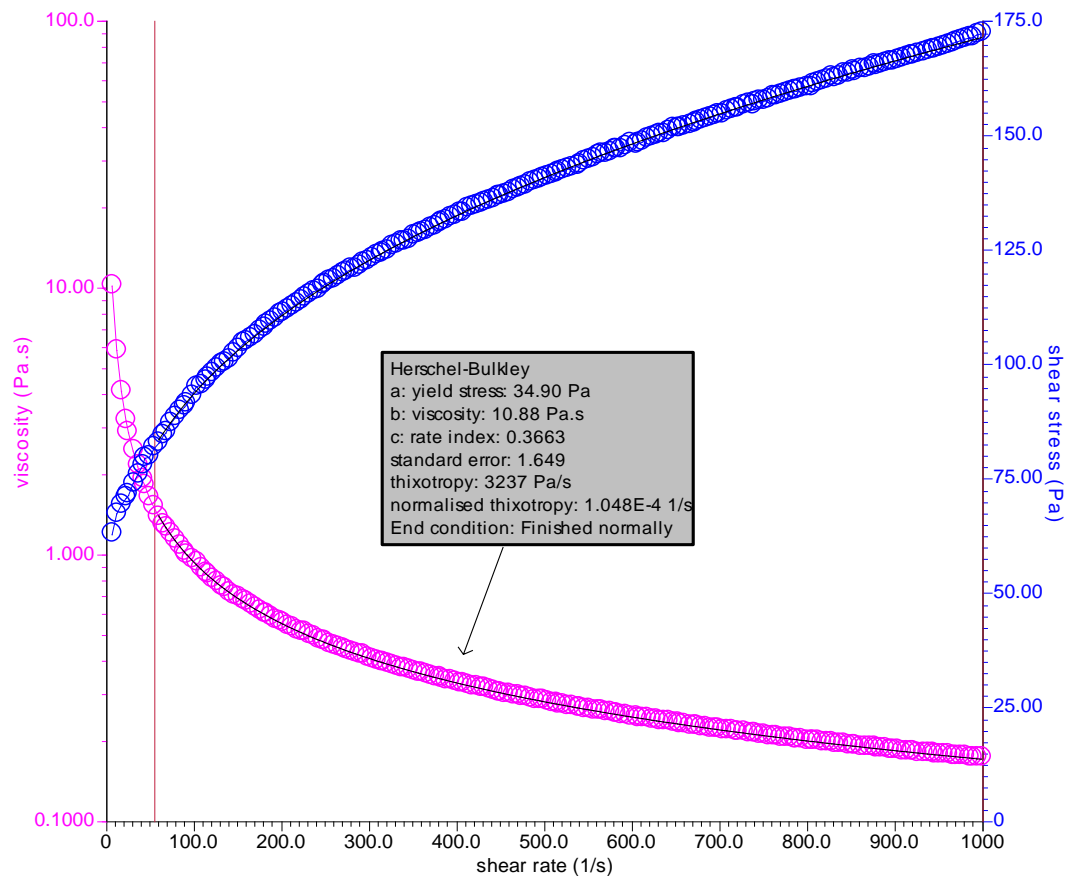
FIGURA 4. PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS DOS MUESTRAS TESTIGOS (SIN TRATAR) DE PURÉ DE MANZANA

Muestra A



CONTINUACIÓN PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS DOS MUESTRAS TESTIGOS (SIN TRATAR) DE PURÉ DE MANZANA

Muestra B



ANEXO M

FIGURA 5. VISTA ESQUEMÁTICA DEL APLICADOR DE RADIOFRECUENCIA DE DOS PLATOS PARALELOS EMPLEADO EN ESTE ESTUDIO

