



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**



18
23

**" ANALISIS TERMICO DEL CALENTAMIENTO POR
MICROONDAS APLICADO A PRODUCTOS
ALIMENTICIOS EMPACADOS "**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS
P R E S E N T A ,
MARIA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO

ASESOR: DR. JOSE LUIS ARJONA ROMAN

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de
Exámenes Profesionales

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el trabajo
Análisis Técnico del Calentamiento por Microondas Aplicado a Productos Alimenticios

Empacados

que presenta la pasante: María del Carmen Valderrama Bravo

con número de cuenta: 8512620-2 para obtener el TITULO de:
Ingeniera en Alimentos

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

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 26 de enero de 1996

PRESIDENTE I.Q. Jorge Martínez Peniche

VOCAL Dr. Alberto Tecante Coronel

SECRETARIO Dr. José Luis Arjona Román

1er. SUPLENTE Dra. L. Patricia Martínez Padilla

2do. SUPLENTE M. en C. Ricardo P. Hernández García

[Handwritten signatures and stamps over the list of names]

**El presente trabajo se desarrollo
en el Laboratorio Experimental
Multidisciplinario de la Nave
2000 en la Facultad de Estudios
Superiores Cuautitlán.**

A mis padres: 

María del Carmen Bravo Paulín.

Tu recuerdo y entrega en la vida de luchar hasta el final por los que amaste lograron la culminación de mi objetivo; y aún con la nostalgia de tu ausencia, donde quiera que te encuentres GRACIAS por todo el Amor y Apoyo que me diste.

Siempre te llevaré en mi corazón.

Jorge Valderrama Monroy.

Aunque en ocasiones no quería escucharte, hoy comprendo que sin tu presencia y palabras tal vez nunca hubiera podido decir con orgullo que tienes una hija Ingeniera. GRACIAS por los consejos y Caridad que me diste y seguiras dando.

Con amor, su hija

A mi Esposo:



Juan Chiu Chan

Tu amor, apoyo y sobretodo la paciencia que has tenido han logrado que esta última etapa de mis estudios culmine. Gracias mi amor por estar siempre conmigo. Te Amo.

A mi Hijo:



Jorge Isaac Chiu Valderrama.

Tu llegada fue el aliciente más grande que tuve para seguir adelante y no hundirme en la depresión; tu sola presencia alegra mi corazón. Con Amor tu Mamá.

A mis Hermanos:

Jorge Valderrama Bravo.

Tú estuviste apoyándome desde que empecé mi formación profesional y juntos hemos salido adelante. Gracias y espero muy pronto poder decirte Ingeniero.

Mario Alberto Valderrama Bravo.

Por ser mi nieta consentida y aunque eres muy travieso, estuviste estos últimos años apoyándome con tu presencia.

Con todo mi cariño

Con Cariño a:

Tere, Marcela, María Inés y Judith por los momentos inolvidables que vivimos durante la carrera y por estar conmigo en todo momento.

A mis Abuelos:

Justa, Leoniza, Pascual y Gregorio.

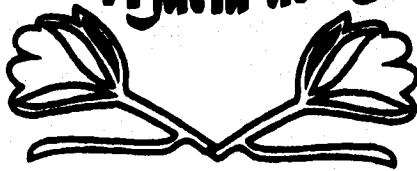
A mis Suegros:

Juan y Mei Lan.

A mis Tíos, Primos y demás familiares:

Y a todas las personas que de alguna u otra forma apoyaron parte de mi formación profesional.

Gracias: María del Carmen.



Agradecimientos:

Al Dr. José Luis Arjona Román por el apoyo, confianza y paciencia.

A los miembros del Jurado:

- * **Dr. Alberto Tecante Coronel.**
- * **Dra. Laura Patricia Martínez Padillo**
- * **M. en C. Ricardo P. Hernández García**
- * **I.Q. Jorge Martínez Poncho**

Por las observaciones que aportaron al presente trabajo.

Al Q.F.B. Juan Chiu Chan por el valioso apoyo.

Al M. en C. Gilberto A. Ameza Ventura por su invaluable aportación y amistad.

A lo I.A. Rosalía Meléndez Pérez por su colaboración y amistad.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

A LA FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN.

Y A TODOS LOS PROFESORES.

INDICE GENERAL

	Página
INDICE GENERAL	1
INDICE DE TABLAS	4
INDICE DE FIGURAS	5
RESUMEN	7
INTRODUCCION	8
OBJETIVOS	10
CAPITULO I	
GENERALIDADES Y ANTECEDENTES	
1.1. Procesos de transferencia de calor	11
1.1.1. Conducción	
1.1.2. Convección	
1.1.3. Radiación	
1.1.3.1. Leyes de radiación	
1) Ley de Kirchhoff	
2) Ley de la distribución de Planck	
3) Ley del desplazamiento de Wien	
4) Ley de Stefan-Boltzmann	
5) Ley de Raleigh-Jeans	
6) Ley de Bourger-Lambert	
1.2. Las microondas	21
1.2.1. Las ondas electromagnéticas	
1.2.2. Características y procesos de calentamiento	
1.2.3. Parámetros que afectan el calentamiento por microondas	
1.2.3.1. Frecuencia	
1.2.3.2. Potencia del horno	
1.2.3.3. Masa	
1.2.3.4. Contenido de humedad	
1.2.3.5. Temperatura	
1.2.3.6. Geometría	
1.2.3.7. Presencia de sales	
1.2.3.8. Conductividad térmica	
1.2.4. Ventajas del calentamiento	
1.2.5. Horno de microondas. Descripción de cada una de sus partes	
1.2.5.1. Magnetron	
1.2.5.2. Suministro de potencia	
1.2.5.3. Tubo de potencia y generador	
1.2.5.4. Sección de transmisión	
1.2.5.5. Agitadores de campo	
1.2.5.6. Cavidad del horno	
1.2.5.7. Puerta	
1.2.5.8. Sellador o estructura hermética	
1.2.5.9. Operantes y cerraduras de seguridad	
1.3. Propiedades dieléctricas	34

1.3.1. Constante dieléctrica	
1.3.2. Factor de pérdida relativo	
1.3.3. Tangente de pérdida	
1.3.4. Propiedades de transmisión	
1.3.4.1. Coeficiente de atenuación	
1.3.4.2. Profundidad de penetración	
1.4. Ecuaciones que rigen el comportamiento de microondas	38
1.4.1. Ecuación que relaciona el calor generado con la intensidad de campo eléctrico	
1.4.2. Ecuación de la potencia absorbida de Lambert	
1.4.3. Ecuación de la segunda ley de Fourier que involucra el término de generación de calor.	
1.5. Materiales de envase y coberturas empleados en microondas	41
1.5.1. Materiales de los envases	
1.5.2. Materiales de cobertura	
1.5.3. Sistemas innovadores de empaque	
1.5.3.1. Sistema de empaque activo Micro Match	
1.5.3.2. Susceptores	
1.6. Generalidades del Bisquet	46
1.6.1. Función de los ingredientes	
1.6.1.1. Harina	
1.6.1.2. Polvo de hornear	
1.6.1.3. Huevo	
1.6.1.4. Grasa	
1.6.1.5. Azúcar	
1.6.1.6. Sal	
1.6.1.7. Leche	
1.6.2. Cambios durante el horneado	

CAPITULO II

DESARROLLO METODOLOGICO

2.1. Cuadro metodológico	53
2.2. Desarrollo metodológico	57
2.2.1. Primera etapa	57
2.2.1.1. Validación de termopares	
1) Repetibilidad	
2) Precisión	
3) Linealidad	
2.2.1.2. Caracterización del equipo	
1) Evaluación del ciclo de encendido y apagado del magnetrón	
2) Localización de la "zona caliente"	
2.2.1.3. Determinación del tiempo máximo de calentamiento del gel	
2.2.1.4. Localización del punto térmico del gel	
2.2.1.5. Obtención de α y Q_0 del gel	
2.2.2. Segunda etapa	64
2.2.2.1. Formulación y proceso de elaboración del bisquet	
2.2.2.2. Localización del punto térmico del bisquet	
2.2.2.3. Determinación del tiempo máximo de horneado del bisquet	

2.2.2.4. Obtención de α y Q_0 del bisquet	71
2.2.3. Tercera etapa	71
2.2.3.1. Evaluación de K'	
2.2.3.2. Evaluación de $\tan \delta$	
2.2.3.3. Cálculo de α' y D_p	
2.2.4. Cuarta etapa	77
2.2.4.1. Balances de energía para el proceso de microondas	
1) Nodos esquina	
2) Nodos orilla	
3) Nodos internos	
2.2.4.2. Elaboración del programa de computo para optimizar condiciones de proceso	
1) Diagrama de flujo	
2) Condiciones requeridas para ejecutar el programa	

CAPITULO III

RESULTADOS Y ANALISIS

3.1. Validación de termopares	84
3.1.1. Repetibilidad	
3.1.2. Precisión	
3.1.3. Linealidad	
3.2. Caracterización del horno	86
3.2.1. Tiempos del ciclo de encendido y apagado	
3.2.2. "Zona caliente"	
3.3. Tiempo máximo de calentamiento del gel	89
3.4. Punto térmico del gel	91
3.5. Valores de α y Q_0 del gel	95
3.5.1. Historias térmicas	
3.5.2. C_p y densidad	
3.5.3. α y Q_0	
3.6. Formulación del bisquet	99
3.7. Punto térmico de los bisquets empacados	100
3.8. Tiempo de cocción del bisquet	102
3.9. Valores de α y Q_0 del bisquet	104
3.9.1. Historias térmicas	
3.9.2. C_p y densidad	
3.9.3. α y Q_0	
3.10. Propiedades dieléctricas	115
3.11. Optimización de las condiciones de proceso	117
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
NOMENCLATURA	122
BIBLIOGRAFIA	124
ANEXO A Método de diferencias finitas explícito.	128
ANEXO B Tablas y gráficas de datos estadísticos.	130

INDICE DE TABLAS

	Página
1.1. Frecuencia de microondas	22
1.2. Aplicación de las microondas en procesos industriales	33
1.3. Envases empleados en microondas	41
1.4. Materiales empleados para películas laminadas	42
1.5. Materiales empleados para películas coextruidas	43
1.6. Materiales empleados para coberturas	44
2.1. Variables involucradas en la experimentación	57
2.2. Técnicas empleadas en la validación de termopares	58
2.3. Formulación base para la elaboración de bisquet	65
3.1. Coeficientes de variación de los termopares	84
3.2. Coeficientes de correlación de los termopares	85
3.3. Ecuaciones de corrección	85
3.4. Tiempos de encendido y apagado del magnetrón	86
3.5. Tiempo máximo de calentamiento para cada gel	89
3.6. Valores de densidad y C_p del gel	97
3.7. Valores de difusividad térmica y Q_0 del gel	97
3.8. Formulación del bisquet	99
3.9. Tiempos de cocción del bisquet	102
3.10. Composición química de la masa y bisquet	111
3.11. Valores de densidad y C_p del bisquet	111
3.12. Valores de difusividad térmica y Q_0 del bisquet	112
3.13. Valores de propiedades dieléctricas y de transmisión.	115
3.14. Valores de la optimización de condiciones de proceso	118

INDICE DE FIGURAS Y GRAFICAS

	Página
1.1. Radiación reflejada, absorbida y transmitida	15
1.2. Potencia emisiva de un cuerpo negro	17
1.3. Comparación de la potencia emisiva de un cuerpo ideal negro y gris con una superficie real	18
1.4. Ley del desplazamiento de Wien	19
1.5. Comparación entre la ley de Planck, Wien y Raleigh-Jeans	20
1.6. Espectro electromagnético	21
1.7. Interacción del campo eléctrico con las moléculas de agua	24
1.8. Carga del electrón en el espacio operando el magnetrón	28
1.9. Magnetrón que opera a 5 kW y 2450 Mhz	29
1.10. Guía de ondas como una sección de transición entre el magnetrón y el horno	31
1.11. Agitadores de campo eléctrico	31
1.12. Representación gráfica de K' y K'' en forma de vectores	37
1.13. Cambios en el horneado	52
2.1. Cuadro metodológico general	53
2.1a. Contenido del conector 1	54
2.1b. Contenido del conector 2	55
2.1c. Contenido del conector 3	56
2.1d. Contenido del conector 4	56
2.2. Horno de microondas	60
2.3. Posiciones para determinar "zona caliente"	61
2.4. Posiciones de los termopares para localizar el punto térmico del gel	63
2.5. Diagrama de proceso de elaboración del bisquet	66
2.6. Posiciones de los termopares para localizar el punto térmico en el bisquet	68
2.7. Circuito de tipo R-C	72
2.8. Fuente de impedancia basada en el puente de Wheatstone	73
2.9. Posición de los nodos	77
2.10. Absorción de calor en la placa cuando se aplica microondas	78
2.11. Diagrama de flujo del programa	81
3.1. Comportamiento térmico para determinar "zona caliente" a potencia de 72 W	87
3.2. Comportamiento térmico para determinar "zona caliente" a potencia de 216 W	88
3.3. Relación de la variación del color en el gel con el tiempo de proceso	89
3.4. Enlaces formados dentro del gel de grenetina	90
3.5. Posibles enlaces entre la grenetina y la anilina	91

3.6. Posición 1 para la localización del punto térmico del gel	92
3.7. Posición 2 para la localización del punto térmico del gel	92
3.8. Posición 3 para la localización del punto térmico del gel	93
3.9. Temperaturas contra frecuencias de Fourier	94
3.10. Historias térmicas del gel sin color	95
3.11. Historias térmicas del gel gris	96
3.12. Historias térmicas del gel negro	96
3.13. Relación de la difusividad térmica con el color del gel	98
3.14. Relación del calor generado con el color del gel	98
3.15. Posición 1 para la localización del punto térmico del bisquet	100
3.16. Posición 2 para la localización del punto térmico del bisquet	101
3.17. Posición 3 para la localización del punto térmico del bisquet	101
3.18. Relación de los empaques con el tiempo de proceso a potencia de 72 W	103
3.19. Relación de los empaques con el tiempo de proceso a potencia de 216 W	104
3.20. Historias térmicas del bisquet empaque 1 potencia 1	105
3.21. Historias térmicas del bisquet empaque 1 potencia 3	105
3.22. Historias térmicas del bisquet empaque 2 potencia 1	106
3.23. Historias térmicas del bisquet empaque 2 potencia 3	106
3.24. Historias térmicas del bisquet empaque 3 potencia 1	107
3.25. Historias térmicas del bisquet empaque 3 potencia 3	108
3.26. Historias térmicas del bisquet empaque 4 potencia 1	109
3.27. Historias térmicas del bisquet empaque 4 potencia 3	109
3.28. Relación de los empaques con la difusividad térmica a potencia de 72 W	112
3.29. Relación de los empaques con la difusividad térmica a potencia de 216 W	113
3.30. Relación de los empaques con el calor generado a potencia de 72 W	114
3.31. Relación de los empaques con el calor generado a potencia de 216 W	114
3.32. Constante dieléctrica con respecto a la temperatura	116
3.33. Profundidad de penetración con respecto a la temperatura	116
B.1. Valores medios de temperaturas para 5 posiciones a 72 W de potencia con un intervalo de confianza del 95 %.	131
B.2. Valores medios de temperaturas para 5 posiciones a 216 W de potencia con un intervalo de confianza del 95 %.	132
B.3. Valores medios de temperaturas para gel con 3 diferentes intensidades de color a 72 W de potencia con un intervalo de confianza del 95 %.	133
B.4. Valores medios de temperaturas para bisquet con 4 diferentes empaques a 72 W de potencia con un intervalo de confianza del 95 %.	134
B.5. Valores medios de temperaturas para bisquet con 4 diferentes empaques a 216 W de potencia con un intervalo de confianza del 95 %.	135

R E S U M E N

En el presente trabajo se realizó un estudio sobre el análisis de la transferencia de calor por microondas a través de una placa, cuyo fin fue seleccionar los materiales de cobertura para empacar bisquet y cocerlos, optimizando las condiciones de proceso. Para las mediciones de temperatura se emplearon termopares de Cromel-Alumel, previamente validados. Como equipo se empleó un horno de microondas el cual se caracterizó con agua. Los datos mostraron que el magnetrón se activa cada 17 s en todas las potencias. Se localizó la "zona caliente" seleccionando la esquina inferior izquierda. Como modelo en el cual se evaluará la relación del calor absorbido con la distribución de calor dentro de un producto se emplearon 3 lotes de gel de grenetina al 10 % en placas de 10 x 6 x 1.5 cm, teniendo una intensidad de color diferente (s/color, gris y negro). El colorante que se empleó fue anilina. El tiempo máximo de calentamiento aumentó a mayor intensidad de color lo que se atribuye a la interacción de la molécula de grenetina con la anilina. El punto térmico se localizó en el centro. Se evaluó el coeficiente de difusividad térmica (α) y calor generado (Q_0) a partir de la 2a. ley de Fourier, notándose que el Q_0 se incrementa al aumentar la intensidad de color, produciendo un calentamiento más uniforme dentro del producto; en consecuencia, dados los resultados se propuso la selección de un empaque que aumente en el producto la absorción de calor. Para ello se elaboraron 4 lotes de bisquet envasados en unigel de 20 x 13.5 x 2.0 cm, empleando 4 diferentes empaques (s/empaque, polietileno, polietileno/papel encerado y polietileno/papel encerado/aluminio). El punto térmico se localizó entre el centro y una orilla. El tiempo máximo de calentamiento aumenta a mayor número de capas de material de cobertura. Se obtuvo α y Q_0 , notándose un incremento de Q_0 a mayor número de capas de material, a excepción del empaque que contenía papel aluminio. Con los valores obtenidos se realizó un análisis comparativo, en base al calor transformado por microondas con el modelo y se seleccionó el polietileno/papel encerado para empacar bisquets. Paralelamente se obtuvo la constante dieléctrica (K') y el factor de disipación ($\tan \delta$) del bisquet a 4 diferentes temperaturas 55, 70, 90 y 120°C. Con los valores de K' y $\tan \delta$ se calculó la profundidad de penetración (D_p), mostrando un aumento al incrementarse la temperatura. Con los datos se obtuvo una ecuación de D_p en función de la temperatura, la cual se involucró en un programa de computo para predecir tiempos de calentamiento dada una temperatura límite y se optimizaron condiciones de proceso. Los resultados óptimos a una potencia incidente (P_0) de 80000 W/m² fueron: 19 x 13 cm, 215 W y 2 min 40 s. De los resultados obtenidos se concluye que la cocción de bisquets por microondas debe llevarse a cabo en envases de 19 x 13 cm y empacarlos con polietileno/papel encerado para obtener un producto final de mejor calidad.

I N T R O D U C C I O N

Desde los finales de los 50s, la industria procesadora de alimentos y la industria de equipo de microondas han estado en contacto. Existen más de 100 patentes en EE.UU. que describen métodos donde utilizan las microondas para hornear, escaldar, fermentar, etc. ⁽⁴⁴⁾

El lento desarrollo del uso de microondas para procesos industriales está relacionado a los altos costos de energías y a la falta de información sobre las propiedades dieléctricas de alimentos con relación a su calentamiento, aunque en los últimos años ha sido económicamente más atractiva debido a las ventajas que ofrece el uso de este equipo; como una reducción en pérdida de producto y un aumento en la calidad del mismo. ⁽¹⁷⁾

Se han llevado a cabo muchos trabajos en Flour Milling and Baking Research Association Laboratories Chorleywood, Inglaterra, sobre horneado de pan en microondas. Se hizo un estudio sobre la elaboración de donas con harina de bajo contenido proteínico las cuales fueron horneadas por microondas, obteniéndose resultados satisfactorios. ⁽³⁾

Se encontró que el horneado en microondas inactiva la α -amilasa antes de que su actividad sea crítica y provoque un rompimiento extensivo del almidón, lo que puede suceder con el método convencional, ocasionando una pérdida de la capacidad de retención de agua y una acumulación de producto final pegajoso, entre otras. ⁽⁴¹⁾

Otra ventaja del horneado por microondas es la reducción del tiempo de horneado, así como el espacio ocupado por el equipo de microondas.

El gran inconveniente de emplear microondas para hornear es que difícilmente se alcanza el dorado y la formación de la costra en la superficie, así como determinados sabores; sin embargo los nuevos métodos referente a enzimología y tecnología de las reacciones de Maillard pueden dar el sabor deseable y los perfiles de aroma que se pierden comúnmente en alimentos microondeables.

Las reacciones de Maillard son responsables de algunos de los aromas y sabores más agradables en los alimentos cocinados. Ellos cubren un rango de empardecimiento, asado y

tostado, que son normalmente generados por los procesos de calentamiento encontrados en el cocimiento de microondas.

La nueva tecnología produce sabores naturales a precios razonables con perfiles más interesantes. La clave es comenzar con materiales derivados de proteínas modificadas con enzimas y subproductos que, por su naturaleza, den precursores potenciales de sabor más complejos y variables. Estos materiales son después reaccionados con azúcares y otros materiales claves para crear sabor tipo Maillard, que la compañía denomina "bloques constructores de sabor". Estos bloques son después balanceados en direcciones seleccionadas con componentes saborizantes naturales para dar el sabor final, adecuado a las aplicaciones necesarias. ⁽⁸⁾

Debido a la gran demanda que presenta el uso de hornos de microondas en el mercado, se han introducido diversos materiales para empacar alimentos, tales como papel, plásticos y contenedores basados en aluminio. Acorde a recientes estudios de Kline & Company los plásticos representan la mayor parte 62%.

La introducción de nuevos productos demanda la producción de nuevos materiales que serán económicos con un mejor acabado para su uso. El plástico es un medio de empaque dinámico que cubre tales condiciones.

En los últimos 15 años se han procesado alimentos empacados con envolturas plásticas en microondas y se demostró una mejor calidad sobre estos productos en comparación con los tratados con los métodos convencionales. ⁽⁵²⁾

Por lo anterior la finalidad del presente trabajo fue seleccionar un material de empaque para la cocción de Bisquet por microondas, mediante un análisis comparativo con un modelo, en el cual se pudiera evaluar la relación existente entre la absorción del calor transformado por microondas y la distribución de calor dentro del producto; así mismo se establecieron las condiciones óptimas de proceso.

O B J E T I V O S

GENERAL

Seleccionar el material de empaque para la cocción de Bisquet por microondas, mediante un análisis comparativo con un modelo, estableciendo las condiciones óptimas de proceso.

PARTICULARES

Analizar la transferencia de calor por microondas a través de una placa de gel de grenetina a diferentes intensidades de calor para obtener la relación entre el calor transformado por microondas y la distribución del mismo dentro del producto.

Analizar el comportamiento térmico por microondas de bisquets empacados con diferentes materiales, realizando un análisis comparativo con el modelo con el fin de seleccionar el empaque más adecuado.

Determinar las condiciones óptimas de proceso (potencia de horno, dimensiones de producto y tiempo) mediante un programa de computo para su posterior aplicación.

CAPITULO I

GENERALIDADES Y ANTECEDENTES

1.1. Procesos de transferencia de calor

Existen tres formas de mecanismos en los cuales el calor se puede transmitir, conducción, convección y radiación. ⁽²⁰⁾

1.1.1. Conducción.

La conducción es la transferencia de calor de un cuerpo fijo, siempre que existe un gradiente de temperaturas.

El mecanismo se lleva a cabo a nivel molecular de la siguiente forma: al aumentar la temperatura de una parte del cuerpo la energía de vibración de las moléculas también aumenta y al friccionarse con otras transmiten parte de su energía, por lo que el calor transmitido de esta forma pasa de una molécula a otra sin que haya un movimiento del cuerpo.

La dirección del flujo de calor siempre es de mayor a menor. ⁽⁴⁸⁾

A principios del siglo XIX el célebre matemático Jean Baptiste Fourier en su obra "Teoría del Calor", desarrolló la ley fundamental del transporte de calor por conducción en estado estacionario. ⁽²¹⁾

$$\delta Q = kA \frac{-\delta T}{\delta x}$$

1.1.

Esta relación cuantitativa establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura y al área de flujo en una dirección. ⁽²⁰⁾

Debido a que no todos los fenómenos ocurren en estado estacionario, se estableció una ecuación que tuviera una aplicación más extensa.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

1.2.

Esta ecuación representa la segunda Ley de Fourier en estado inestable en una sola dirección.⁽²⁹⁾

La ecuación también puede representarse en 2 o 3 direcciones, por lo que para generalizarla se involucra un término que represente el gradiente de temperaturas.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \nabla^2 T$$

1.3.

1.1.2. Convección.

Es la transferencia de calor por el movimiento de un material. Si el movimiento del material se produce por agitación mecánica, el proceso se denomina convección forzada. La agitación mecánica puede aplicarse por medio de un agitador, aún cuando en muchos casos de proceso se induce el movimiento circulando los fluidos fríos y calientes a velocidades relativamente altas y en sentidos opuestos.

Este proceso de transferencia de calor se rige mediante la siguiente ecuación:

$$\delta Q = h A \delta T$$

o en forma integrada

$$Q = h A \Delta T$$

1.4.

El coeficiente convectivo (h) se ve influenciado por la naturaleza del fluido y el régimen de flujo.

Esta ecuación es mejor conocida como Ley de Newton del enfriamiento.⁽²⁹⁾

1.1.3. Radiación.

La radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de todos los cuerpos. A esta energía se le llama "energía radiante" y se encuentra en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz y se transmite a través del vacío, lo mismo que lo hacen a través del aire. ⁽⁴⁶⁾

Se es conocido que un cuerpo a cualquier temperatura emite radiación, conocida algunas veces como radiación térmica. Las características de esta radiación dependen de la temperatura y de las propiedades del objeto. ⁽⁴⁷⁾

A diferencia de los otros mecanismos de transferencia de calor, la radiación no requiere de un medio para transportar calor ya que puede transmitirlo a través del vacío absoluto. ⁽²⁹⁾

La energía radiante se considera como consistente de un campo eléctrico oscilante, acompañado por un campo magnético también oscilante en fase con él.

La variación de la intensidad con el tiempo del campo eléctrico pasando por un punto dado puede representarse por una onda senoidal que tiene una longitud finita de cresta a cresta y se denomina longitud de onda (λ). El número de ondas que pasan por un punto en la unidad de tiempo es la frecuencia de radiación (f). ⁽²⁹⁾

Hay muchas formas de energía electromagnética, tales como, las ondas de radar, rayos infrarrojos, rayos ultravioleta, rayos x, microondas, etc. Las ondas difieren en su longitud de onda y frecuencia, así como su origen y utilidad. ⁽¹⁾

Existen diversas teorías acerca del origen de la energía radiante que postulan lo siguiente.

1) Se cree que la energía radiante se origina dentro de las moléculas del cuerpo radiante, los átomos presentes en éstas vibran en un movimiento armónico simple con oscilaciones lineales. La emisión de energía radiante es ocasionada por una disminución en las amplitudes de vibraciones dentro de las moléculas; por el contrario una absorción de energía representa un aumento. ^(1, 29)

2) El modelo de Bohr puede mostrar un entendimiento más claro. Debido a que los electrones giran sobre una órbita alrededor del núcleo de un átomo, a una cierta distancia, habrá por consiguiente una determinada energía. Si hubiera una colisión de un átomo con un electrón, éste podría ser desplazado de su órbita y pasar a otra en la que los electrones poseen diferente energía. Si el electrón se desplaza de una órbita de mayor energía a una de menor, el reajuste se efectúa radiando el exceso de energía. ^(39,40)

3) Por último se cree que el origen de la energía radiante se debe a la vibración de 2 o más núcleos de una molécula, lo que ocasiona un cambio en la amplitud de la vibración y por consiguiente un cambio en el contenido de su energía, ya que hubo una alteración en la energía cinética de traslación o rotación, dando como resultado una emisión de la energía radiante. ^(1, 29)

Todos los cuerpos arriba de la temperatura del cero absoluto ceden calor a sus alrededores debido a que emiten radiación. ⁽⁴⁷⁾

Si un cuerpo a una temperatura inicial T_1 se encuentra rodeado por unas paredes que tienen una temperatura T_2 , el cuerpo va a alcanzar la temperatura T_2 , ya que se alcanza el "equilibrio térmico" en el entorno. En el "equilibrio térmico" el cuerpo debe emitir la misma energía radiante por unidad de tiempo que la que absorbe. ⁽⁴⁶⁾

CONCEPTO DE CUERPO NEGRO

Para comprender el concepto de "cuerpo negro" es importante conocer que la energía incidente hacia un receptor está dado por:

$$\alpha + \gamma + \tau = 1$$

1.5.

α - La fracción de energía absorbida y se le conoce como coeficiente de absorción o absorbencia.

γ - La fracción de energía reflejada y se le conoce como coeficiente de reflexión o reflexividad.

τ - La fracción de energía transmitida y se le conoce como transmisividad.

De esto se puede concluir que el cuerpo negro es un sistema ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre él y que por lo tanto no va a reflejar ni transmitir energía, es decir: $\alpha=1$, $\gamma=0$ y $\tau=0$.⁽²⁹⁾

La figura 1.1. muestra como incide, transmite, refleja y absorbe la energía sobre un cuerpo.

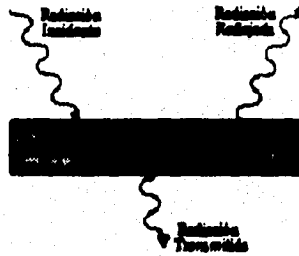


Figura 1.1.
Radiación reflejada, absorbida y transmitida.⁽⁴²⁾

Así como el cuerpo negro absorbe toda la energía incidente, será también un "emisor" de energía ideal.⁽⁴⁶⁾

De aquí la "emisividad" (ϵ) se define como la relación del poder emisivo total de la fuente y el poder emisivo del cuerpo negro a las mismas condiciones. Por consiguiente para un cuerpo negro $\epsilon = 1$.⁽¹⁾

1.3.1.1. Leyes de radiación.

Antes de hablar sobre las leyes de radiación, es necesario diferenciar la "radiación monocromática" y la "radiación total". La primera es emitida en todas direcciones desde un pequeño elemento de área de la superficie radiante, a través de una semiesfera con centro en el área de radiación. La segunda, es la suma de todas las "radiaciones monocromáticas".⁽⁵⁴⁾

1) Ley de Kirchhoff

Esta ley establece que todos los cuerpos al llegar al equilibrio térmico, la energía absorbida y la emitida es igual.

Para llegar a la expresión matemática de esta ley, se establece que para un cuerpo que alcanza el equilibrio se tiene:

$$E = q_1 A \alpha \quad 1.6.$$

Si el cuerpo es reemplazado por un cuerpo negro de idénticas dimensiones, entonces:

$$E_n = q_1 A \alpha_n \quad 1.7.$$

Pero como para un cuerpo negro $\alpha = 1$, por consiguiente la ecuación 1.7. queda:

$$E_n = q_1 A \quad 1.8.$$

Dividiendo la ecuación 1.6. y la 1.8., se tiene:

$$\frac{E}{E_n} = \alpha \quad 1.9.$$

Por definición se conoce que la emisividad es la relación del poder emisor total con respecto a la del cuerpo negro.

$$\epsilon = \frac{E}{E_n} \quad 1.10.$$

Por lo anterior la ecuación 1.9. y la 1.10. representan:

$$\alpha = \epsilon \quad 1.11.$$

La ecuación 1.11. representa la expresión matemática de la ley de Kirchhoff. ⁽²⁶⁾

2) Ley de la distribución de Planck.

La ley de distribución de Planck establece la relación existente del poder emisor monocromático de un cuerpo con la longitud de onda y la temperatura

$$E_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}$$

1.12.

La figura 1.2. nos muestra la relación de E_{λ} como una función de la temperatura y la longitud de onda.

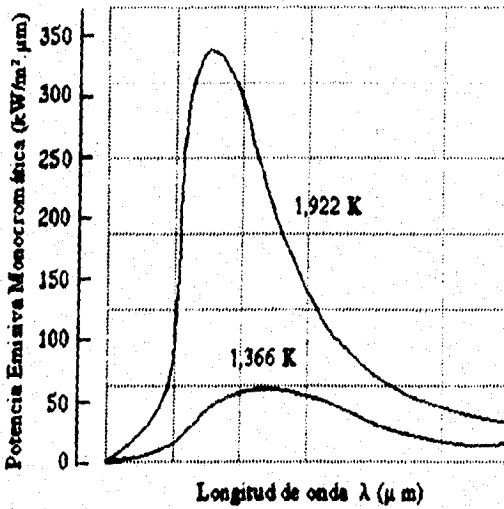


Figura 1.2.

Potencia emisiva de un cuerpo negro ⁽²⁶⁾

Como se observa en la gráfica los picos de las curvas se ven modificados a pequeños valores de longitud de onda, debido al incremento de temperatura.

La gráfica 1.3. muestra la relación de E_{λ} con la longitud de onda y temperatura para un cuerpo negro y un gris ideal comparado con una superficie real.

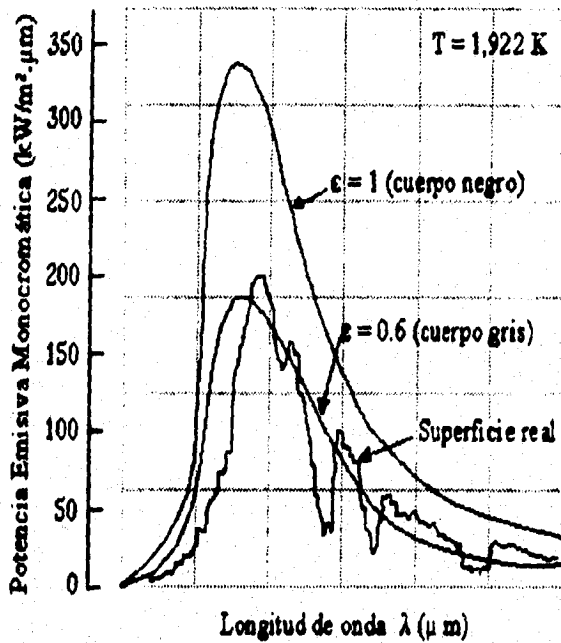


Figura 1.3.

Comparación de la potencia emisiva de un cuerpo ideal negro y gris con una superficie real ⁽²⁶⁾

En la gráfica 1.3 se observan variaciones en los puntos máximos de la curva real con respecto a las ideales (gris y negro), lo que explica el cambio de color de un cuerpo al calentarse. ^(47, 26)

3) Ley del desplazamiento de Wien.

Esta ley nos relaciona los puntos máximos en las curvas de radiación mostradas en la ley de Planck, la cual expresa:

$$\lambda_{\max} T = 2897.6 \quad [=] \quad \mu\text{m} K$$

1.13.

La variación de λ_{\max} con la temperatura se muestra en la figura 1.4. ⁽⁴⁶⁾

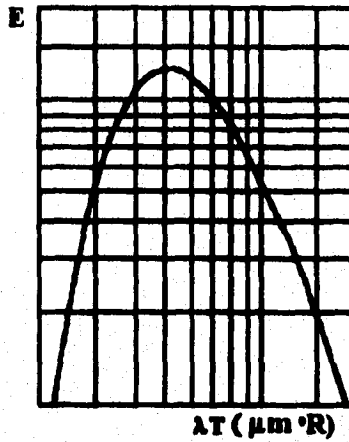


Figura 1.4.
Ley del desplazamiento de Wien.⁽²⁶⁾

4) Ley de Stefan-Boltzmann.

La ecuación de esta ley se obtiene por integración de la fórmula de distribución de Planck y establece que la radiación total emitida de un cuerpo negro ideal es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo.

$$E_{em} = \sigma T^4$$

1.14.

A esta ley se le llama ley de Stefan-Boltzmann porque fue deducida por él en la segunda ley de la termodinámica.⁽²⁶⁾

5) Ley de Raleigh-Jeans.

El modelo clásico de la radiación de un cuerpo negro se conoce como la ley de Raleigh-Jeans, la cual se expresa en la ecuación 1.15.

$$E_{em} = \frac{2 \pi c \sigma T}{\lambda^4}$$

1.15.

Este modelo de cuerpo negro establece que los átomos de las paredes que conforman su cavidad se consideran como osciladores que emiten ondas electromagnéticas en un amplio rango de longitudes de onda, con la cual se obtiene una energía promedio por oscilador proporcional a la temperatura.

La figura 1.5. muestra una comparación de la ley de Planck, Wien y Raleigh-Jeans

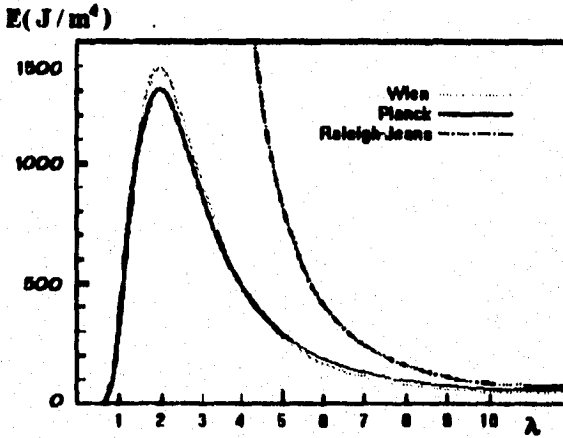


Figura 1.5.
Comparación entre la ley de Planck, Wien y Raleigh-Jeans (47)

Como se observa en la gráfica 1.5. para longitudes de onda larga la ley de Raleigh-Jeans concuerda con lo establecido por la ley Wien y Planck, discrepando en las longitudes de onda cortas, ya que según el modelo de Raleigh cuando la longitud de onda se aproxima a cero la energía se aproxima a infinito, lo cual es absurdo en el campo electromagnético. Cabe mencionar que para longitudes de onda larga la ecuación de Planck se asemeja a la de Raleigh-Jeans.

6) Ley de Bourger-Lambert.

Esta ley establece que a medida que las radiaciones se van absorbiendo de la superficie al interior, la radiación incidente disminuye en forma exponencial.

Para esto se tiene que cuando un haz luminoso pasa por una lámina delgada de espesor δx , se tiene que la disminución δq_x de la potencia es proporcional a la potencia inicial q_0 y al espesor δx , por lo que se tiene entonces:

$$\delta q_x = -\alpha q_x \delta x$$

1.16.

Al integrarse la ecuación 1.16. se obtiene:

$$q_x = q_0 e^{-\alpha x}$$

1.17.

A la ecuación 1.17. se le conoce como la Ley de Bouger-Lambert. (46, 47)

1.2. Las Microondas

1.2.1. Las ondas electromagnéticas.

Se ha visto que las ondas electromagnéticas viajan en el vacío con la rapidez de la luz. Estas ondas transportan energía y cantidad del movimiento desde una fuente hasta un receptor. En 1887, Hertz generó y captó exitosamente ondas electromagnéticas de radiofrecuencias, predichas por Maxwell. En esta época las únicas ondas conocidas eran las ondas de radio y las de la luz visible. En la actualidad se saben que existen otras formas de ondas electromagnéticas entre las cuales se encuentran las microondas, como se muestra en la figura 1.6.

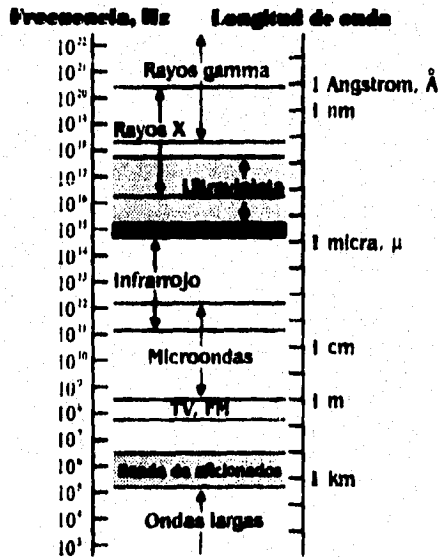


Figura 1.6.
Espectro Electromagnético (47)

Como se observa en la figura 1.6. las microondas se localizan entre la radiación infrarroja y las ondas de radio, cuya longitud de onda va de aproximadamente 1mm a 30 cm. Debido a su corta longitud de onda las microondas habían sido muy útiles en sistemas de radar, aunque no tardó en dársele aplicación a procesos de calentamiento. Con ello se centró el desarrollo en la construcción e hornos de microondas domésticos.

Las aplicaciones industriales que se le dio fue el tratamiento del carbón para removerle los sulfuros orgánicos y otras sustancias contaminantes, vulcanización de hule, descongelamiento y calentamiento de alimentos. (1, 42, 47)

Las frecuencias de microondas se encuentran muy cercanas a las ondas de radio, por lo que pueden obatacular las comunicaciones, por consiguiente la tabla 1.1 muestra las frecuencias de las microondas usadas a nivel industrial y doméstico.

TABLA 1.1
Frecuencias de microondas^(1,2)

FRECUENCIA (Hz)	RANGO (Hz)
915	± 25
2450	± 50
5800	± 75
22125	± 125

De estas frecuencias las más empleada son 915 MHz y 2450 MHz, cuya longitud de onda es calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad \lambda = \frac{C}{f}$$

1.18.

Por consiguiente los valores de λ son 0.122 m para una $f=2450$ MHz y 0.32 m para una $f= 915$ MHz. (21)

1.2.2. Características y Procesos de Calentamiento.

Debido a que las microondas son ondas electromagnéticas, están compuestas de un campo eléctrico y un magnético. ⁽¹³⁾

Las microondas son generadas por un dispositivo conocido como "magnetron", el cual invierte la polaridad de 60 Hz a 2450 MHz o 915 MHz.

Algunos materiales dieléctricos como el agua contienen dipolos permanentes debido a su distribución de cargas positivas y negativas, al penetrar las microondas interactúan con las cargas, originando que las moléculas oscilen con el fin de alinearse al campo eléctrico generado. La molécula gira primero en una dirección y luego en la opuesta, ocasionando una colisión entre las moléculas y debido a la frecuencia de las microondas las colisiones ocurren millones de veces por segundo, provocando una fricción intermolecular que genera calor en el interior del material, el cual es transferido por conducción. ^(13, 27, 32, 42)

En la figura 1.7. se explica como se comporta el campo eléctrico con la presencia del agua.

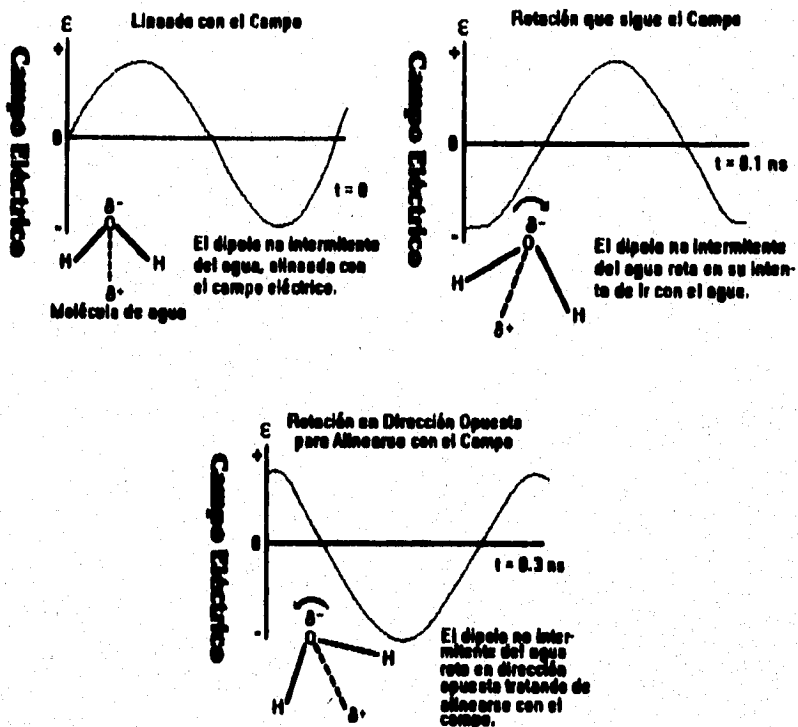


Figura 1.7.
 Interacción del campo eléctrico con las moléculas de agua.⁽¹⁹⁾

Los iones positivos y negativos de las sales disueltas en alimentos, también interactúan con los campos eléctricos migrando hacia las regiones cargadas opuestamente del campo eléctrico y rompiéndose los enlaces de hidrógeno con el agua para generar el calor adicional.

La interacción de los campos magnéticos son insignificantes, puesto que los alimentos contienen sólo trazas de minerales magnéticos.^(20, 27)

1.2.3. Parámetros que afectan el calentamiento por microondas.

1.2.3.1. Frecuencia.

La frecuencia puede afectar las propiedades dieléctricas del material y como consecuencia la profundidad de penetración de las microondas. Por ejemplo, para el agua la profundidad de penetración a 2450 MHz es de 2.3 cm y a 915 MHz es de 20 cm. ⁽⁴⁴⁾

1.2.3.2. Potencia de microondas.

La velocidad de calentamiento de microondas es usualmente controlada variando la potencia.

La cocción, horneado y otros procesos alimenticios son sistemas fisicoquímicos complejos que para iniciar y acelerar reacciones necesitan una determinada cantidad de calor. Sin embargo estas reacciones deben ocurrir adecuadamente a un tiempo dado. Es posible que con el calentamiento por microondas se forme más calor, de tal forma que el alimento lo pueda retener.

Uno de los mejores ejemplos de la naturaleza crítica del valor de calentamiento es el horneado. El horneado es un proceso similar a inflar un balón, mientras se forman sus paredes. Si se infla demasiado rápido se rompe la estructura, por el contrario si el proceso es demasiado lento se colapsa. Esto es lo que sucede con el horneado de microondas si se hace muy rápido. Para evitar esto se recomienda bajar el nivel de potencia. ^(27, 33)

1.2.3.3. Masa.

Si la cantidad de masa es pequeña es mejor emplear horno batch; sin embargo si la cantidad de masa es grande se puede emplear bandas transportadoras, ya que tienen la ventaja de proporcionar un calentamiento uniforme debido al movimiento que tiene el producto en el campo de microondas. ^(29, 33)

1.2.3.4. Contenido de humedad.

Si el contenido de humedad de un alimento es mayor, el calentamiento puede ser más rápido, aunque un alimento con poca humedad puede presentar una tendencia similar al calentarse debido a que su calor específico disminuye. ⁽²⁷⁾

1.2.3.5. Temperatura.

La temperatura inicial de los productos debe controlarse para saber a que nivel de potencia va a operar el horno de microondas, con el fin de obtener uniformidad de calentamiento. ⁽¹⁷⁾

1.2.3.6. Geometría.

Una geometría regular proporciona un calentamiento más uniforme, se debe de evitar bordes puntiagudos y esquinas para no ocasionar un recalentamiento. La forma redonda es mejor que la cuadrada.

En cuanto a tamaño de producto se refiere, es importante considerar que no sea muy grande en comparación a la longitud de onda porque puede llevarse a cabo un calentamiento no uniforme. ⁽⁴⁴⁾

1.2.3.7. Presencia de sales.

La adición de sales incrementa la velocidad de calentamiento, pero en algunos casos puede ocasionar un calentamiento excesivo cerca de las superficies y dejar partes frías en el interior. ⁽³³⁾

1.2.3.8. Conductividad térmica.

Esta puede tener un efecto importante en el calentamiento de grandes materiales donde la profundidad de penetración no es lo suficientemente grande para calentar uniformemente el alimento o cuando el tiempo de calentamiento por microondas es muy largo. ⁽⁴⁴⁾

1.2.4. Ventajas del calentamiento por microondas.

1) La velocidad de calentamiento es mayor en comparación a los métodos convencionales con lo que se reduce el tiempo de proceso.

2) Las microondas generan calor en el interior del alimento, ocasionando una distribución de temperaturas más uniforme, evitándose con ello recalentamiento en la superficie.

3) La calidad del producto puede mejorarse, evitando que el producto se endurezca.

4) Se obtiene un calentamiento más selectivo en el sentido de que las microondas entran en contacto absorbiendo la energía, lo que ocasiona un calentamiento más eficiente y como consecuencia un adecuado perfil de temperaturas.

5) Se pueden introducir materiales como el polietileno, polipropileno, papel, vidrio, unice!, que son transparentes a las microondas y que al emplearlos puede mejorar la calidad del producto. ⁽¹⁷⁾

A pesar de las ventajas que ofrece el calentamiento por microondas es importante tomar en cuenta algunas consideraciones.

-No es conveniente introducir material reflejante en el horno (metales), ya que puede ocasionar daños en el equipo.

-Al incidir la energía de microondas en el producto, parte puede ser reflejada, lo que ocasiona niveles de potencia incidentes altos y bajos en la cavidad del microondas, que dan como resultado una distribución de energía desigual en la superficie del producto. Este problema puede minimizarse usando agitadores de onda que distribuyen las microondas más uniformemente, o rotando el producto en el horno de microondas por medio de un plato giratorio. ^(27, 44)

1.2.5. Horno de microondas. Descripción de cada una de sus partes.

1.2.5.1. Magnetron.

El magnetron es el componente más importante del horno de microondas, el cual es un oscilador de microondas autoexcitables. Contiene 2 electrodos, un ánodo de cobre cilíndrico que contiene el circuito que determina la frecuencia de microondas y un cátodo o filamento que es la fuente de electrones. El cátodo está adentro y en forma coaxial con el ánodo. El ánodo toma la forma de un circuito periódico de microondas que consiste de un número de cavidades resonantes. El espacio entre el ánodo y el cátodo se conoce como espacio de interacción, donde la energía es transferida desde el haz de electrones rotantes hasta el circuito periódico de microondas. El circuito periódico y el haz electrónico son formados en un círculo para hacerlo un bucle cerrado. Esto da la retroalimentación necesaria para la oscilación del tubo. Sólo aquellas frecuencias con un número integral de longitud de onda alrededor del bucle cerrado serán generadas.

Con el ánodo a potencia de tierra, un voltaje alto negativo es aplicado al cátodo. Los electrones son emitidos desde el cátodo calentado y sin la presencia de un campo magnético, los electrones viajan radialmente al ánodo. Cuando un campo magnético es aplicado en dirección paralela con el eje del tubo, los electrones caen a un camino turbado hacia el ánodo y forma una nube electrónica rotante, como se muestra en la figura 1.8.

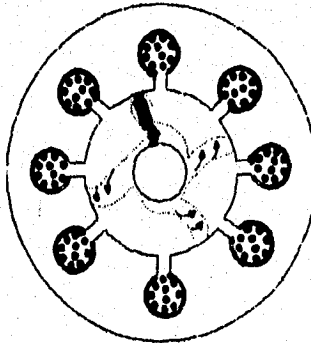


Figura 1.8

Carga del electrón en el espacio operando el magnetron.⁽¹⁶⁾

Si el campo magnético es lo suficientemente fuerte se evita que los electrones alcancen el ánodo por lo que el magnetron se desactiva.

El flujo de corriente del ánodo excita las oscilaciones de la cavidad resonante que, a su vez, influyen la forma de la nube electrónica rotante. Algunos electrones decaen y otros son arrojados, dependiendo de la dirección del campo eléctrico así como de los electrones que pasan a través de él. Los electrones al aumentar su velocidad regresan al cátodo y liberan electrones secundarios que se impactan con el cátodo. Los electrones que decaen, y que han perdido la mayor parte de su energía por el circuito resonante a través de su recorrido eventualmente se incorporan al ánodo a bajas velocidades.

La nube de electrones rotantes se supone que es como un rayo que rota a una velocidad constante dando grandes cantidades de energía para el campo de microondas. La energía de microondas es acoplada por medio de un tubo desde una de las cavidades resonantes hacia un ensamble de salida o antena que está puesto hacia una línea de transmisión, normalmente una guía de ondas o línea coaxial.

La figura 1.9. es un típico magnetrón de 5 kW y 2450 MHz.

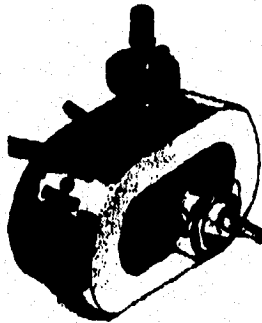


Figura 1.9.
Magnetron que opera a 5 kW y 2450 MHz.⁽¹⁶⁾

El conector de entrada está en la parte superior, la de salida coaxial, está en el frente y los tubos enfriadores del ánodo se pueden ver por detrás del tubo, el cual tiene un magneto permanente y un electromagneto. El electromagneto permite que la potencia sea variada al empujar o mover los campos fijos. La antena de salida en la parte superior es insertada dentro de una guía de ondas de la misma forma que un tubo de horno de microondas.

El magnetron es activado por medio ciclo y desactivado otro medio ciclo. La corriente promedio y por lo tanto la potencia de salida es proporcional al área bajo la forma de onda corriente.

El ciclo de trabajo, que es la relación del tiempo de activado y desactivado del magnetrón está relacionado a la capacitancia, impedancia del magnetrón y a las propiedades de regulación de voltaje del transformador de alto voltaje. La corriente promedio del magnetrón es proporcional al ciclo de trabajo y por ello puede cambiarse dentro de los límites, variando el valor del capacitor.

1.2.5.2. Suministro de potencia.

El principal propósito del suministro de potencia es el voltaje necesario para operar el magnetrón. Un magnetrón requiere miles de Volta de corriente directa para su operación.

Control de la potencia variable.

El suministro de poder es activado y desactivado por un contacto que está controlado por un cronómetro. El control transistorizado del ciclo de trabajo se conecta a un transformador primario de alto voltaje activándose y desactivándose con un "triac", variando así la potencia de salida promedio del magnetrón.

A una descarga, el cronómetro divide el tiempo en periodos repetitivos, normalmente unos pocos segundos. También manda pulsos de 50/60 Hz al "triac" durante estos periodos. La relación activado-desactivado (ciclo de trabajo) puede variarse ajustando el número de impulsos en el periodo con un potenciómetro.

La selección de fuente de alta potencia o múltiples bajas potencias a 2450 MHz para un proceso particular estará basado en diversas consideraciones, incluyendo el requerimiento total de potencia, necesidad de distribución de energía, naturaleza del material a ser procesado, costo del equipo y facilidad de mantenimiento.

1.2.5.3. Tubo de potencia o generador.

Protege al magnetrón del daño que puede producir la potencia reflejada, y consiste de un material de metal cerámico.

1.2.5.4. Sección de transmisión.

Los hornos de microondas tienen una guía de ondas para transferir las microondas desde el magnetrón hacia el horno (Figura 1.10).

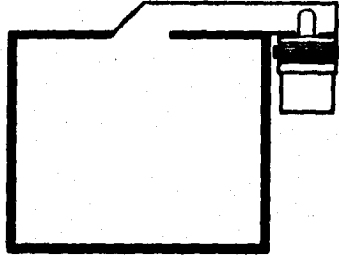


Figura 1.10

Guía de ondas como una sección de transición entre el magnetrón y el horno⁽¹⁶⁾

1.2.5.5. Agitadoras de campo.

Los alimentos no son materiales dieléctricos uniformes por lo que al colocarlo dentro del horno hace que la distribución de energía tienda a ser no uniforme. Uno de los métodos de resolver esta perturbación del campo de microondas es alterar continuamente la geometría del horno, cambiando la posición de los nodos y antinodos continuamente, tal que la distribución de energía en el tiempo de exposición a las microondas sea ecualizada, dando como consecuencia un calentamiento más uniforme al alimento. Esto se logra instalando una hoja reflectora llamada campo o agitador de modo.

El agitador puede tener la apariencia de un ventilador, como se observa en la figura 1.11.

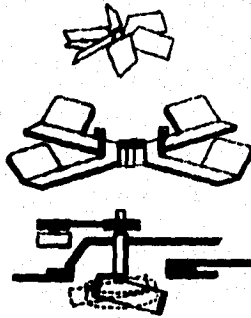


Figura 1.11.

Agitadores de campo eléctrico⁽¹⁶⁾

1.2.5.6. Cavidad del horno.

Es una cavidad resonante dentro en la cual las ondas son reflejadas, ocasionando múltiples ondas estacionarias que pueden entrar en fase y antifase ocasionando puntos fríos y calientes dentro del horno.

1.2.5.7. Puerta.

Permite la entrada y salida del material a ser calentado.

1.2.5.8. Sellados o estructura hermética.

Evita fugas de las microondas del horno.

1.2.5.9. Operancia y cerraduras de seguridad.

Su función es evitar que la puerta se abra cuando este operando el horno. ^(16, 33)

1.2.6. Aplicaciones industriales.

La tabla 1.2. muestra la aplicación industrial de procesos alimenticios en los cuales se emplea la energía de microondas.

TABLA 1.8. Aplicación de las microondas en procesos industriales

PROCESO	APLICACION	VENTAJAS	DESVENTAJAS	ALTERNATIVAS
Blanqueado (27, 40)	Inactivación de enzimas en frutas y vegetales, maíz, patatas.	-Menos pérdida de vitamina C.	-Elevados costos de operación.	Combinación de procesos, primero cocinando en método convencional, reduciendo el tiempo 2/3.
Precocido y Cocido (15, 37)	Jamón, pates de carne y aves, patatas.	-Incrementa la producción ya que no hay pérdida de producto por sobrecocida. -Menos pérdidas de humedad. -Reducción en el tiempo de cocción.	-No se alcanza dorado del producto.	Combinación de procesos para lograr el crispado de los productos.
Secado (15, 37, 41)	Papa, condimentos, pasta de tomate, bocadillos, arroz, huevo.	-En el caso de pastas se logra menos endurecimiento de la superficie. -Se emplea 1/3 menos de energía en el secado de pastas. -Reduce 2/3 partes del tiempo.	-No tuvo mucho éxito el secado de papa ya que hubo problemas con el control de la materia prima, además que se mejoró el método convencional.	Combinando los dos métodos reduce el tiempo a la mitad.
Temperado (15, 37)	Carnes de res, puerco, pescado.	-Minimiza el crecimiento microbiano y descomposición en las regiones cercanas a la superficie. -Poca o ninguna pérdida de peso. -Incrementa la retención de jugos en carnes. -Menos espacio. -Reducción de cargas de trabajo. -Las pérdidas por goteo se reducen del 5-10%. -Ahorro de días en el tiempo.	-La capa externa puede absorber cantidades significativas de energía de microondas y producir un sobrecalentamiento cerca de la superficie.	En realidad ninguna ya que éste proceso ha teído mucho éxito.
Pasteurización (15, 45)	Pan rebanado y empaquetado, leche, cerveza, yoghurt, vino.	-Se obtiene mayor vida de anaquel. -Ahorros en costos de transportación debido a que hay menos entregas frecuentes. -Menos alteraciones en el color y sabor.	-En leche el proceso es muy complejo y más costoso.	
Esterilización (15, 36)	Alimentos empaquetados bajo presión como rebanadas de carne, pastas.	-Mejora en calidad del producto. -Reduce personal.		
Liofilización (15, 30)	Carne, pescado, café, frutas y vegetales.	-Menor costo de operación.	-Sobrecalentamiento en la capa congelada. -Parcial sobrecalentamiento en la capa seca. -Se ha observado que el calentamiento no es uniforme.	Se considera que se mejora la calidad combinando los dos métodos.
Horneado (16, 27, 41)	Panes, galletas, donas.	-Inactiva rápidamente la α-amilasa impidiendo que rompa el almidón.	-No se alcanza la formación de dorado.	-Emplear las técnicas convencionales y microondas. -Combinar con radiación infrarroja para dorar la superficie.

1.3. Propiedades Dieléctricas y Ecuaciones Básicas

Las propiedades eléctricas de interés básico en el procesado de alimentos por microondas son, la constante dieléctrica relativa (K') y el factor de pérdida relativo (K'').

Las propiedades dieléctricas de alimentos a frecuencias de microondas son determinados por su humedad, sólidos y contenido de sal. ⁽³¹⁾

1.3.1. Constante dieléctrica relativa.

La constante dieléctrica relativa refleja la habilidad de un producto para almacenar energía. ⁽³¹⁾

Para comprender el término de K' se discutirá el concepto de un capacitor.

Un capacitor es un dispositivo que consta de dos conductores o placas cercanas, que tienen cargas de misma magnitud pero de signo contrario y que pueden emplearse para almacenar carga eléctrica. ⁽¹²⁾

Faraday encontró que para un capacitor que contiene un dieléctrico entre sus placas la capacitancia es mayor que para uno sin dieléctrico a un misma diferencial de potencial. Con ello se definió la K' , como la relación de las capacitancias con y sin dieléctrico, o como la relación de la constante dieléctrica del material y la constante dieléctrica del vacío.

$$K' = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0}$$

1.19.

Los cambios que ocurren en la capacitancia desde C_0 a C es debido a la polarización de la sustancia bajo la influencia del campo presente cuando las placas del capacitor son cargadas. ⁽¹²⁾

FACTORES QUE AFECTAN A K'

1) FRECUENCIA

- a) Si la frecuencia es baja se tiene una K' alta.
- b) Si se tienen frecuencias intermedias como las de microondas, los valores de K' tienden a ser intermedios.
- c) A frecuencias altas la K' es pequeña.

2) CONTENIDO DE HUMEDAD

- a) A mayor contenido de humedad K' es mayor.

3) DENSIDAD

- a) K' aumenta en forma lineal al incrementar la densidad.

4) TEMPERATURA

- a) A temperaturas menores a 0°C, presenta valores pequeños.
- b) A temperaturas próximas a 0°C se incrementa su valor.
- c) A temperaturas superiores a 0°C decrece. ⁽⁴³⁾

1.3.2. Factor de pérdida relativo.

El factor de pérdida relativo representa la habilidad de los materiales para disipar la energía eléctrica, aunque también se considera como una medida del grado de penetración de las microondas a los materiales. ⁽³¹⁾

Debido a que las microondas transforman energía a calor en cuanto penetran a los materiales, mientras más grande sea K' mayor será el calor producido y por consiguiente más corta es la distancia que penetran las microondas. ⁽²⁷⁾

FACTORES QUE AFECTAN A K''

1) FRECUENCIA

La frecuencia afecta según sea el material, por ejemplo:

- a) En agua K'' es mayor en frecuencias altas.
- b) En una solución salina K'' es menor a frecuencias altas.

2) CONTENIDO DE HUMEDAD

- a) A mayor contenido de humedad mayor K'' , aunque puede disminuir en algunos casos.

3) CONTENIDO DE GRASA

- a) K'' disminuye cuando se incrementa el contenido de grasa.

4) TEMPERATURA

- a) Es menor para hielo que para agua.
- b) Alcanza su valor máximo a 0°C . (42, 43)

1.3.3. La tangente de pérdida.

Debido a que el factor de pérdida es muy complejo de evaluarse, se involucra un término que relaciona K' y K'' , que se le llama tangente de pérdida ($\tan\delta$) o factor de disipación..

$$\tan\delta = \frac{K''}{K'}$$

1.20.

La $\tan\delta$ relaciona la habilidad del material a disipar la energía eléctrica por calor con la capacidad de ser penetrado por un campo eléctrico. (31, 42)

Retomando el concepto del capacitor, revisado en el punto 1.3.1., cuando ocurre la polarización habrá dos corrientes involucradas, una se encuentra 90° fuera de fase con el voltaje aplicado y la otra está en fase con el potencial y representa una pérdida ohmica. Estas corrientes se presentan como dos vectores en la siguiente figura.

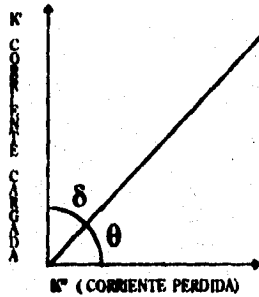


Figura 1.12.

Representación gráfica de K' y K'' en forma de vectores.

En la figura 1.12. la corriente total es el vector suma de las 2 corrientes involucradas y en las que se involucran el ángulo θ , que es el ángulo del factor de potencia, y el ángulo δ , que es el ángulo entre la corriente total y la corriente cargada, cuya tangente es la de interés.^(1, 42)

1.3.4. Propiedades de transmisión.

Las propiedades dieléctricas básicas están relacionadas a otras propiedades que afectan la distribución de la energía eléctrica dentro del producto.

1.3.4.1. Coeficiente de atenuación.

La distribución de la energía dentro de un material biológico es relacionada por un coeficiente de atenuación (α') en el que se involucra la K' y la $\tan\delta$. El valor de α' varía con el tiempo y posición durante el ciclo de calentamiento, como una función de la frecuencia y del gradiente de temperaturas.

$$\alpha' = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{K' \sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1}{2}}$$

1.21.

1.3.4.2. Profundidad de penetración.

El valor de α' es comúnmente expresado como el recíproco de la profundidad de penetración, que es la distancia de la superficie del material al cual la potencia de las ondas decrece $1/e$ (37 %) de su valor original. (13, 31)

Por consiguiente la profundidad de penetración se expresa en la siguiente ecuación como:

$$D_p = \frac{1}{\alpha'}$$

1.22.

ó bien

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{K' \sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1}}$$

1.23.

1.4. Ecuaciones que rigen el comportamiento del calentamiento por microondas.

1.4.1. Ecuación que relaciona el calor generado con la intensidad de campo eléctrico.

La ecuación puede derivarse de las ecuaciones de Maxwell que relaciona las ondas electromagnéticas:

$$Q_e = 2\pi f \epsilon_0 K'' E^2$$

1.24

(3)

La intensidad de campo eléctrico depende de diversos factores:

1) Cierta tipo de ondas estacionarias causan que la distribución espacial del campo dentro de la cavidad sea desigual. El campo eléctrico es cero a la posición de los nodos y no se

genera calor en el alimento. En los antinodos el campo eléctrico es máximo y el calor de la generación de calor es máximo.

2) El tamaño global del alimento influye en su campo eléctrico interno. Cuando las microondas son raramente reflejadas desde las paredes metálicas del horno pueden directamente ser dirigidas al alimento, pero pueden alcanzar otra pared sin encontrarse con el alimento. Así, una fricción de la energía de microondas o es disipado por las paredes o regresa al magnetrón, por lo que la energía disipada aumenta con los volúmenes de la carga.

3) El campo eléctrico presente en el alimento puede ser afectado por el diseño del empaque, se ha observado que un empaque de aluminio de multicompartimiento en el que cada componente tiene la parte superior cubierta por aluminio, la presencia del mismo material como único, da una mayor distribución de campo eléctrico. Tales empaques controlan la potencia total de absorción, así como la distribución de energía, por consecuencia los alimentos en diferentes compartimientos pueden ser calentados aproximadamente a la misma temperatura final con un perfil de calentamiento más uniforme. ⁽⁶⁴⁾

4) También afectan al campo eléctrico el diseño del horno y las propiedades dieléctricas.

Es difícil medir o predecir los valores de campo eléctrico dentro de un alimento ya que no existe un sensor para medir la intensidad de campo directamente. La predicción teórica es complicada debido a que las ecuaciones para las ondas electromagnéticas deben resolverse numéricamente. ⁽¹³⁾

Por lo anterior para determinar el calor generado por las microondas dentro de un alimento se han empleado otro tipo de ecuaciones.

1.4.2. Ecuación de potencia absorbida de Lambert.

Esta ecuación se basa en el modelo establecido por Bourger-Lambert, donde se supone que hay una variación exponencial de la intensidad de campo desde el borde del alimento hacia su interior.

$$Q_x = Q_0 e^{-2ax}$$

1.25

(3)

En términos de potencia la ecuación queda:

$$P_x = P_0 e^{-2ax}$$

1.26.

1.4.3. Ecuación de la segunda ley de Fourier que involucra el término de generación de calor.

Para el calentamiento en microondas, la ecuación que gobierna la energía es la segunda ley de Fourier (revisado anteriormente en el tema de conducción), donde en el balance se involucra la transferencia de calor por radiación ⁽¹⁾.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \nabla^2 T + \frac{Q_0}{\rho C_p}$$

1.27.

El término Q_0 es a lo que se le llama calor "generado" por radiación, que en realidad es la transformación de una energía electromagnética proveniente de las microondas a calor. El proceso de este fenómeno se explicó en el punto 1.2.2.

La ecuación 1.27 puede resolverse por el método de diferencias finitas, considerando el Q_0 como un decaimiento exponencial, según la ecuación 1.25.

Cabe aclarar que la variación real se puede determinar si se conoce el valor de campo eléctrico presente para cada caso en particular, pero el calcular el valor de Q_0 considerando una caída exponencial es razonable siempre que el efecto enfocador de las microondas este ausente. ⁽¹⁴⁾

1.5. Materiales de envases y sus condiciones complementarias para su utilización.

1.5.1. Materiales de los envases.

Los envases empleados para microondas están sometidos a grandes oscilaciones de la temperatura. Esta demanda plantea a su vez una serie de problemas a su consideración.

Un envase que es empleado para alimentos en un horno de microondas debería tener resistencia a una temperatura mayor a 100°C. Sin embargo, los alimentos no se calientan para más de 100°C y de hecho la mayoría de los alimentos se calientan a temperaturas inferiores a 100°C. Algunas veces se requieren envases que soporten temperaturas mayores a 100°C. Es necesario garantizar que cuando se calienta un alimento en un horno de microondas se calienta a una temperatura menor a 100°C. En un horno de microondas se calienta un alimento a una temperatura menor a 100°C.

1.5. Materiales de envases y coberturas empleados para microondas.

1.5.1. Materiales de los envases.

Los envases empleados para microondas están empezando a ganar aceptación en el mercado. Esta demanda permite a numerosos materiales plásticos a ser considerados. ⁽⁶³⁾

Un envase que es empleado para calentar en un horno de microondas tendrá una resistencia a una temperatura mayor a 100°C. Sin embargo, este requerimiento de temperatura varía con el tipo de alimento y el tipo de cubierta usada durante el proceso de calentamiento. Algunos productos requieren envases que toleran temperaturas mayores de 150°C. El material deseable microondeable tendrá un uso adecuado de rango de temperatura de 163°C en la parte máxima y -34°C en la parte mínima para productos congelados. Esta temperatura deseable se da para que también el envase pueda ser usado en horno convencional. ^(3, 64)

La siguiente tabla muestra las características y tipos de algunos envases que se emplean para el calentamiento por microondas.

TABLA 1.5
Envases empleados en microondas ^(18, 59)

ENVASE	VENTAJA	DESVENTAJA
Resina de unión de polifenileno/Poliéstereno PPO/PS	<ul style="list-style-type: none"> -Tolera temperaturas de 100-110°C. -Buena firmeza. -Transparente a las microondas. -Buenas propiedades aislantes del PS. 	<ul style="list-style-type: none"> -Pobre barrera para el O₂, CO₂, vapor de agua. -El PPO es de elevado costo.
Polipropileno PP	<ul style="list-style-type: none"> -Tolera temperaturas de 121°C. -Económico. -Alta firmeza. 	<ul style="list-style-type: none"> -No es recomendable a productos con alto contenido de azúcar y grasa, ya que sufren un sobrecalentamiento y quema el PP.
Policarbonato PC	<ul style="list-style-type: none"> -Tolera temperaturas de 180°C. -Brillante y firme. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto costo. -Pobre barrera al O₂ y agua.
Tereftalato de Polietileno Cristalizado CPET	<ul style="list-style-type: none"> -Tolera temperaturas de 268°C. -No proporciona sabor y olor al alimento. -Resistencia a aceites y grasas. -Brillantes. -Moderada barrera al O₂ y vapor de agua. -Se usa en hornos convencionales. 	<ul style="list-style-type: none"> -Poca resistencia al impacto. -Elevado costo.
Copolíster Kodar Thermx	<ul style="list-style-type: none"> -Alimentos flexibles -Tolera temperaturas hasta de 285°C. -Su costo es menos elevado en comparación al CPET. 	
Nilon 6,6. o Poliamida.	<ul style="list-style-type: none"> -Tolera temperaturas de 268°C. -Es aplicable a hornos convencionales. -Alta resistencia al impacto. -Acabado de brillo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto costo. -Pobre barrera al O₂ y agua.

1.5.2. Materiales de cobertura

La selección del material de cobertura depende de sus características como: hermeticidad, destapado, resistencia al calor, barrera a O₂ y agua, facilidad de grabado, entre otras.

Los materiales de cobertura para microondas se dividen en tres grupos, películas laminadas, películas coextruídas y películas de cobertura. ^(2, 52)

1.5.2.1. Películas laminadas.

La fabricación de películas laminadas constituidos por dos o más capas mejora su aspecto, permeabilidad y resistencia mecánica. El método más común de elaboración consiste en el laminado por adhesión, en el cual se aplica sobre cada una de las láminas una capa de adhesivo que se va a dejar secar para que posteriormente se peguen a presión entre dos rodillos. ⁽²²⁾

Las películas laminadas son un proceso de bajo costo, pero para poder ser cobertura de los envases deben resistir altas temperaturas, tener una capa hermetizadora para adherir los materiales, una barrera al oxígeno y una tapa final. ⁽⁵²⁾

Los materiales empleados en cada parte se muestran en la siguiente tabla.

TABLA 1.4
Materiales empleados para películas laminadas ^(18, 28, 52)

TIPO DE CAPA	MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
HERMETIZADORA	Acetato de etilen vinil EVA	-Material más usado como cobertura sellante en caliente
	Resinas de polietileno de baja densidad LDPE	-Posee un rango más amplio de temperaturas que el EVA -Es adecuado para sellar películas poliolefinicas.
BARRERA DE O ₂	Cloruro de Polivinilideno PVDC	-Generalmente se usa como solvente sobre poliéster. -Transparente a las microondas.
	Extrusión de Alcohol etilen vinílico EVOH	-Transparente a las microondas
	PPO	-Resistencia a altas temperaturas -Firmeza -Bajo costo.
TAPA FINAL	Tereftalato de polietileno PET	-Resistencia a altas temperaturas -Firmeza -Bajo costo.
	PP	-Resistencia a altas temperaturas -Mejor firmeza y maleabilidad que PPO y PET -Bajo costo

1.5.2.2. Películas coextruidas.

Las películas coextruidas se elabora por extrusión simultánea de dos o más capas de distintos polímeros. Estas películas poseen las siguientes ventajas:

- a) Son impermeables y de características semejantes a las multilaminares.
- b) Son más baratas ya que se eliminan solventes o adhesivos para pegar las capas.
- c) Son más delgadas que los laminados y más parecidas a las películas simples.
- d) No se despegan.

Las combinaciones múltiples pueden utilizar las propiedades de barrera, opacidad, firmeza y hermeticidad al iniciarlos con una capa sencilla de película.

Para que los materiales queden intensamente pegados, los copolímeros empleados deben poseer una estructura química, una fluidez y una viscosidad semejante.^(18, 52)

La siguiente tabla 1.5. muestra algunas características de los materiales empleados para películas coextruidas.

TABLA 1.5.

Materiales empleados para películas coextruidas⁽⁵²⁾

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Nilón/Polietileno de alta densidad (HDPE)	• Reduce transmisión de oxígeno y agua. • Posee alto rango de temperaturas.	• Es difícil de sellar. • No funciona en todos lo envases.
HDPE/LDPE	• El HDPE posee alta resistencia a las temperaturas. • El LDPE es buen sellante • Alta resistencia a la transmisión de agua.	• Alta transmisión de oxígeno.
Coextrusiones de EVOH	• Transparentes a las microondas • Bajos valores de transmisión de oxígeno.	• Alta transmisión de agua.

1.5.2.3. Películas de cobertura.

Las películas de cobertura son usadas por convertidores de películas flexibles para eliminar un paso en las estructuras de películas de laminado múltiple. Las combinaciones múltiples pueden combinar las propiedades de barrera, opacidad, firmeza y hermeticidad iniciando con una simple capa de película. Una cobertura selladora puede ser usada en vez de coextruir una capa de película barrera. Estas coberturas son emulsiones o retículas que cubren uno o ambos lados de una estructura de la película.⁽⁵²⁾

La siguiente tabla muestra características de los materiales más usados en microondas.

TABLA 1.6.
Materiales empleados para coberturas (18, 52)

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> -Compatible con todos los plásticos usados en empaque de alimentos. -Permanecen estables en ciclos de refrigeración y congelación. -Con una capa de PVDC son transparentes a las microondas. -Ofrece buenas propiedades de ser impermeable al agua y oxígeno. 	<ul style="list-style-type: none"> -No son recomendables para calentar por encima de la temperatura ambiental.
LDPE	<ul style="list-style-type: none"> -Impermeable al vapor de agua. -Es de bajo costo en comparación con otras películas flexibles. -Tolera temperaturas altas de aproximadamente 121°C. 	<ul style="list-style-type: none"> -Es sensible a olores y aceites.
HDPE	<ul style="list-style-type: none"> -Es más impermeable a gases y agua. -Su temperatura de reblandecimiento es mayor que la de LDPE. 	<ul style="list-style-type: none"> -Es menos flexible y más quebradizo.
PP	<ul style="list-style-type: none"> -Muy impermeable al vapor de agua, gases y olores. -Tolera temperaturas aproximadas a las de LDPE. 	<ul style="list-style-type: none"> -Puede estirarse menos que el polietileno a elevadas temperaturas.
Copolíster Kodar Therman	<ul style="list-style-type: none"> -Tolera temperaturas hasta de 245°C. -Es una película fuerte, clara. -Es excelente para este tipo de aplicación con respecto a los demás. 	<ul style="list-style-type: none"> -Su costo es más elevado con respecto a los otros materiales.

1.5.3. Sistemas innovadores de empaques.

Una de las más grandes necesidades tecnológicas para los empaques de microondas es la integración de materiales con sistemas especiales que puedan tener todas las ventajas de cada característica de acabado de los materiales. Algunos de los sistemas innovadores que han surgido son los sistemas de empaque Micro Match y susceptores.

1.5.3.1. Sistema de Empaque Activo Micro Match.

El Micro Match de Alcan es un sistema de empaque activo compuesto de hojas de aluminio sobre una parte de cobertura plástica para controlar el oscurecimiento y tostado de alimentos. El envase puede ser plástico, papel o aluminio. Debido a que muchos productos alimenticios envasados en plásticos o cartón pueden presentar valores de temperaturas mayores en los bordes que en el centro, el Micro Match está diseñado para distribuir la energía de microondas más eficazmente y por consiguiente obtener un calentamiento más uniforme. Con esto

se puede eliminar la opción de cambiar la potencia, el plato giratorio y como consecuencia una reducción del tiempo de proceso.

Con el sistema Micro Match se puede obtener una energía de microondas más intensa hacia la superficie de productos alimenticios, dando la posibilidad de enfocarse a problemas comunes como el tostado y el oscurecimiento de diversos alimentos.

Una de las primeras aplicaciones comerciales del sistema Micro Match apareció en Japón en 1989, donde se dio el efecto de oscurecimiento a entremeses gratinados.

Una desventaja del Micro Match es la necesidad del diseño de un envase específico, ya que la colocación de las hojas de aluminio dentro de las tapas varía de un producto alimenticio a otro y el tiempo que se necesita para determinar estas condiciones puede no ser económico.

1.5.3.2. Susceptores.

Debido a que los hornos de microondas no logran el oscurecimiento y tostado de diversos alimentos, muchos de estos tienden a ablandarse por la condensación del vapor de agua en la superficie. Además el patrón fortuito de las microondas dentro de la cavidad del horno, frecuentemente crean un calentamiento no uniforme.

Por lo anterior se han empleado "susceptores" en empaques de alimentos con la finalidad de convertir la energía de microondas en calor radiante.

Los susceptores normales consisten de una película fina resistente al calor, en el cual una capa fina de metal ha sido depositado. Los metales disponibles para este proceso son: aluminio, cromo, cobre, oro, hierro, níquel, paladio o cualquier combinación de metales.

Una estructura susceptora típica consiste de alimento/película/metal/adhesivo/papel.

Entre los candidatos para películas susceptoras son: Polieteramida, PET, Copoliéster Therman y PEN 10533

A pesar del éxito comercial de los susceptores, ha surgido dudas sobre su seguridad. A mitad de 1989 la FDA emitió un reglamento que incluía a proposición de regulación de materiales susceptores usados en las aplicaciones a temperaturas de 150°C o mayores.⁽⁵²⁾

1.6. Generalidades del bisquet

Es posible hacer bisquet con una gran variedad de formulaciones, preservándose con los que se obtiene buenos resultados y que pueden ser aún mejorados. Sus ingredientes básicos son: azúcar, sal, leche, manteca, harina y polvo de hornear. A estos se les puede adicionar huevo, mantequilla y otros ingredientes adicionales (lo cual caracteriza las diversas formulaciones).

El bisquet es un bocado hecho en panadería que varía en tamaño, forma, relleno y tipos de formulación. Son de elaboración sencilla pero requieren cuidado, atención y el necesario entendimiento para obtener un producto estándar.⁽⁶¹⁾

1.6.1. Función de los ingredientes básicos.

1.6.1.1. Harina.

Al humedecer la harina, las capas de proteína se separan en fibrillas de las células transportando con ellas gránulos de almidón, que cuando se unen con las moléculas de agua forman una red.⁽⁹⁾

De una manera lenta, a través de sus zonas amorfas, los gránulos de almidón absorben agua, lo cual ocasiona un hinchamiento del mismo. Del almidón la mayor parte que se absorbe es la amilosa, sin embargo es posible que parte de la amilopectina también se absorba.^(6, 35)

Cuando las suspensiones de almidón se calientan los puentes de hidrógeno intermoleculares de las zonas amorfas se rompen, por lo que la absorción de agua es mayor, dándose por consiguiente la gelatinización del almidón.

En el momento que se alcanza la temperatura de gelatinización, que es de 60°C a 70°C, se pierde la birrefringencia y se alcanza el máximo hinchamiento de los gránulos de almidón.⁽⁶⁾

En el momento que las partículas de harina se combinan con agua y se amasan, parte de ésta se encuentra unida a almidón y proteína, formando con ello una masa coherente cuyo carácter viscoelástico se atribuye al gluten.

El gluten se desarrolla amasando las partículas deshidratadas de la harina. Si la cantidad de agua a harina es mayor, se obtiene una masa blanda y "pegajosa", por lo que es necesario, para desarrollar el gluten, amasar la pasta mecánicamente con un tenedor o unas hojas de batidora. Por el contrario, si la cantidad de agua a harina no es mayor, se obtiene una masa elástica y firme que se puede manipular para amasar sobre una superficie plana.

Cuando la masa se somete a calor el gluten aumenta de volumen; esto es debido a la presión del gas en expansión y a la capacidad del gluten de estirarse sin permitir que se escape el vapor.

Una vez que el gluten se ha expandido la presión de vapor mantiene el volumen hasta que las proteínas se hayan fijado; si el producto horneado se retira antes, el vapor se condensa y como consecuencia se colapsa.

Cuando se ha alcanzado el volumen óptimo, se baja la temperatura del horno para evitar que el exterior se queme antes de que el interior se haya terminado de cocer.

Tanto el gluten como el almidón contribuyen a las estructuras semirrígidas que resultan del calentamiento de la masa. ^(8, 35)

1.6.1.2. Polvo de hornear.

El leudado de productos horneados es esencial en la calidad del producto final. Sin agentes leudantes, el producto sería un producto horneado con poco volumen, alta densidad, insuficiente levantamiento y consistencia correosa.

El leudado puede obtenerse mediante los siguientes medios:

- a) Fermentación.
- b) La descomposición al estado gaseoso de sustancias sensitivas al calor, tales como bicarbonato de amonio.
- c) Reacción química de ácidos o sales ácidas con bicarbonato de sodio, que en presencia de agua y calor se produce dióxido de carbono.
- d) Leudado de productos horneados por medio de vapor.
- e) Aireación física con aire. ⁽⁶⁾

Debido a que en la elaboración de bisquet se emplea un agente químico para llevar a cabo el leudado, sólo se describirá brevemente la función de éste.

Existen sustancias como el bicarbonato de sodio que a 60°C y en un ambiente húmedo liberan dióxido de carbono, aún sin la presencia de ácidos leudantes.

La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



1.28.

El inconveniente de no usar ácidos leudantes es que se forma carbonato de sodio, ocasionando que la masa se haga fuertemente alcalina, por lo que se tiene que emplear un compuesto que contenga dichos ácidos. Comúnmente el que se emplea es el polvo para hornear.

Existen dos tipos de polvos para hornear en el mercado:

a) Los polvos para hornear de simple acción liberan todo el dióxido de carbono durante la preparación de la masa.

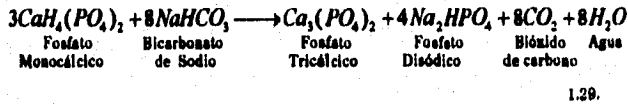
b) Los polvos para hornear de doble acción reaccionan una vez en el mezclado y nuevamente en el horneado. ⁽⁹⁾

Los polvos para hornear de doble acción son usados para la mayoría de las aplicaciones.

El único polvo de hornear en el mercado para el hogar es uno de acción lenta o doble que está formado con dos ingredientes reactivos ácidos, uno de los cuales es el monohidrato de fosfato monocalcico y el otro es sulfato de aluminio sódico (SAS), que aunque no sea propiamente un ácido al reaccionar con agua caliente da lugar a la formación de éste.

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:

Primera Reacción.

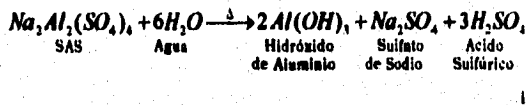


En esta reacción lo que se libera es Bióxido de Carbono en la masa, debido al fosfato monocálcico.

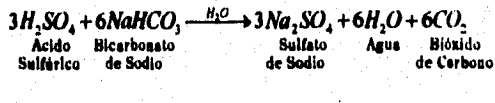
Segunda Reacción

Esta reacción se lleva a cabo en dos etapas.

En la primera el SAS reacciona con el agua caliente, formando ácido sulfúrico.



En la segunda etapa el ácido sulfúrico se combina con el Bicarbonato de Sodio, liberando Bióxido de Carbono.



En esta reacción el Bióxido de Carbono se libera durante el horneado.

El polvo de hornear de doble acción de este tipo contiene SAS y Fosfato monocálcico en relación de 2:1, y se le conoce como **SAS-Fosfato**.

Las ventajas que ofrece emplear Polvos de Hornear de doble acción son:

1) Mientras más rápido actúe el polvo de hornear, menor será la tolerancia de un amasado, ya que casi las 3/4 partes del Bióxido de Carbono existente es liberado en esta etapa, mientras que con el SAS-Fosfato sólo se libera una tercera parte.

2) Incrementa el volumen final del producto horneado debido a la liberación de bióxido de carbono durante el horneado.

3) Mejora la vida de anaquel de las harinas preparadas y de los polvos para hornear. ⁽⁶⁾
9, 49)

1.6.1.3. Huevo.

Contribuye al sabor y color; además ayuda a formar la estructura rígida de los panes, que se mantiene así misma alrededor de la burbuja de gas, aun después que el pan se enfríe. Esto es debido a la cantidad de proteínas que contienen. ^(38, 49)

1.6.1.4. Grasa.

La grasa interfiere en el desarrollo del gluten, permitiendo a las partículas proteicas deslizarse sobre otras, lo que ocasiona un producto suave al cortar o morder.

Cuando la masa se cuece la grasa se funde, depositándose alrededor de las paredes celulares de la estructura en proceso de coagulación, ablandando y lubricando la textura. ^(38, 49)

1.6.1.5. Azúcar.

Al igual que la grasa, el azúcar funciona para ablandar los productos; además proporciona sabor dulce, retiene humedad, mejora la estabilidad y elasticidad e incrementa el oscurecimiento enzimático. ⁽⁴⁹⁾

1.6.1.6. Sal.

La sal es adicionada para el sabor y mejorar el manejo de la masa, retarda la absorción del agua y el hinchamiento de las proteínas de harina, disminuyen la actividad del gluten, así como la extensibilidad de la masa y mejora la retención del gas. ⁽⁶⁾

1.6.1.7. Leche.

Contribuye al sabor, a obtener la consistencia deseada del producto, además por su contenido de proteínas puede contribuir a la formación de la estructura.

1.6.2. Cambios durante el horneado.

Durante el horneado diversos cambios toman lugar tanto en la costra como el migajón, las cuales se van a llevar a cabo a diferentes velocidades. Entre estas se encuentran:

1) En la primera etapa aumenta la actividad enzimática y el crecimiento de levaduras y bacterias.

2) Cerca de 50°C a 60°C mueren las levaduras y bacterias con la subsecuente producción y expansión de gases.

3) Por encima de dicha temperatura (60°C a 70°C) gelatiniza el almidón, coagulan las proteínas y se inactivan las enzimas

4) Deshidratación parcial debido a la evaporación del agua alrededor de los 100°C, temperatura a la cual es establecido el volumen final y la textura del migajón del pan. El interior del pan nunca excede los 100°C, sin embargo en la costra se logran mucho mayores temperaturas.

5) Desarrollo de sabores en el rango de 110°C a 150°C, por la formación de dextrinas ligeras y café.

6) Por encima de 150°C a 200°C se forma la corteza debido a la deshidratación superficial y ocurren las Reacciones de Maillard. En estas reacciones se involucra la caramelización del azúcar y la interacción entre los azúcares y los materiales proteínicos impartiendo sabores y un color oscuro a la costra ^(26, 27)

La figura 1.13. esquematiza los cambios de horneado con la temperatura.

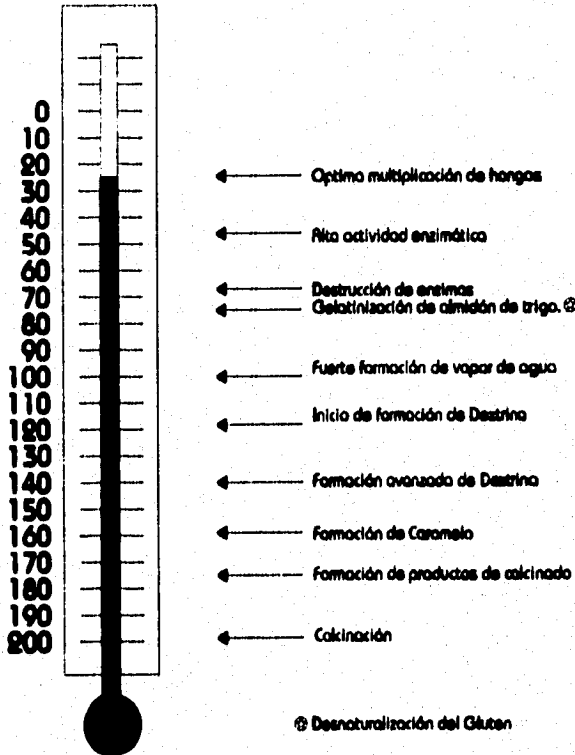


Figura 1.13.
Cambios durante el horneado. ⁽³⁶⁾

En el caso de productos horneados por microondas difícilmente se puede llevar a cabo la formación de la costra, ya que en el interior del producto se alcanzan temperaturas mayores que las obtenidas en el método convencional, por lo que el llegar a temperaturas mayores a los 120°C en la superficie, se obtendría un producto duro por la rápida evaporación del agua. ⁽³⁷⁾

CAPITULO II

2.1. Cuadro metodológico.

La figura 2.1. muestra el cuadro metodológico general en forma de conectores.

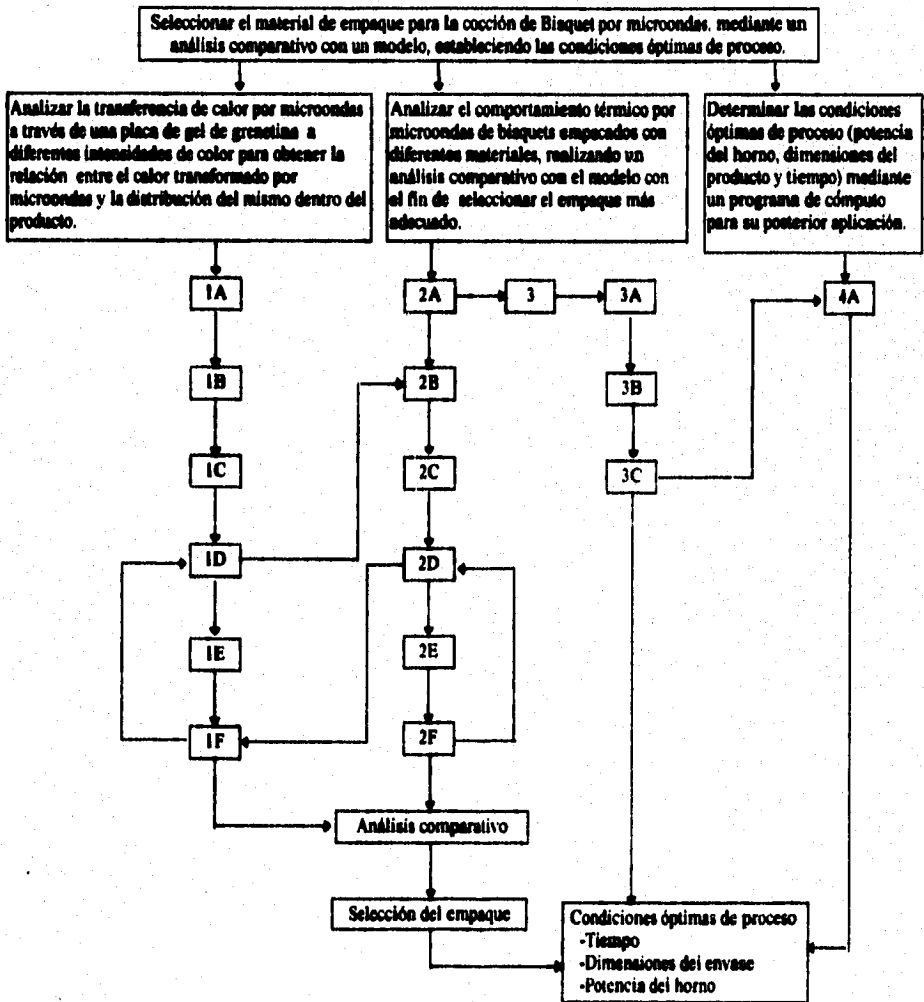


Figura 2.1. Cuadro metodológico general.

El contenido del conector 1 (A-F) se muestra en la figura 2.1a.

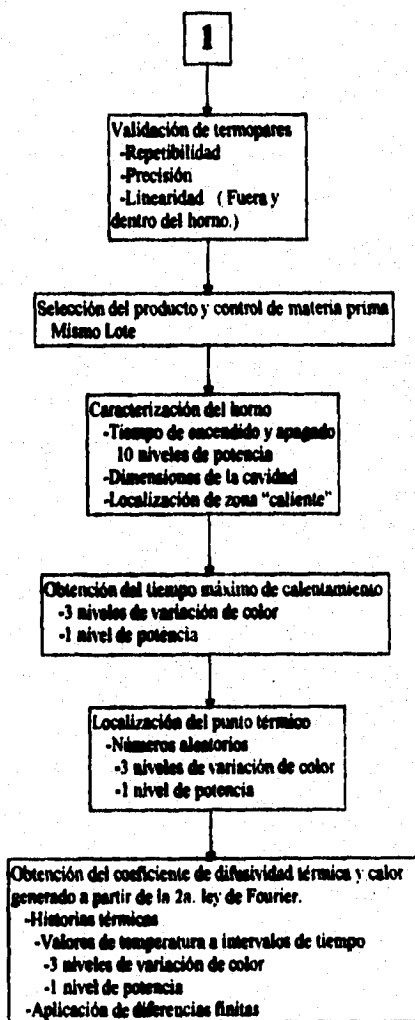


Figura 2.1a.
Contenido del conector 1.

El contenido el conector 2 (A-F) se muestra en la figura 2.1a.

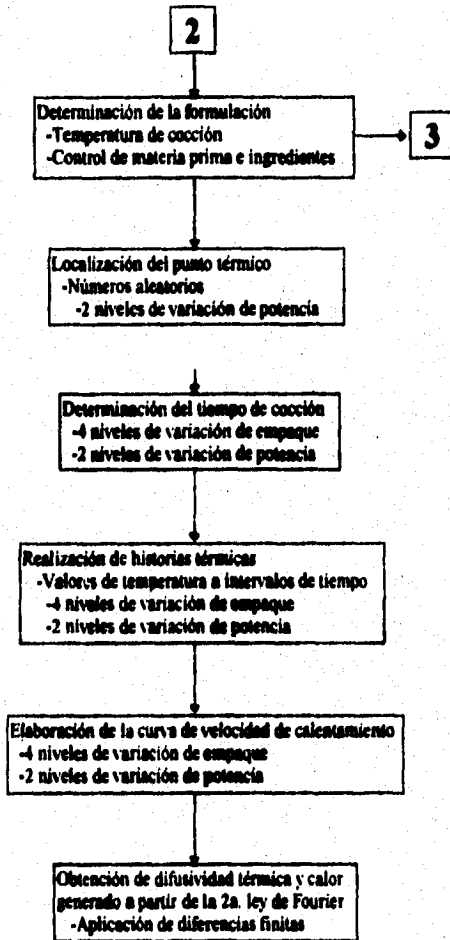


Figura 2.1b.
Contenido del conector 2.

El contenido de los conectores 3 (A-C) y 4 (A) se muestran en las figuras 2.1c. y 2.1d.

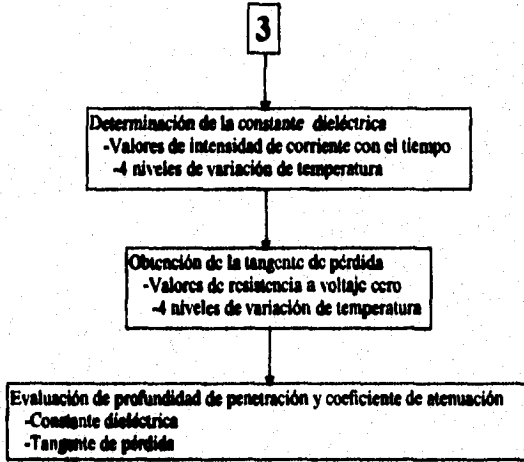


Figura 2.1c.
Contenido del conector 3.

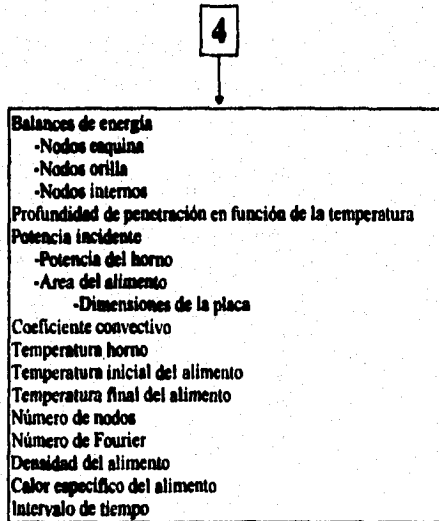


Figura 2.1d.
Contenido del conector 4

2.2. Desarrollo Metodológico.

El desarrollo metodológico se dividió en cuatro etapas con el fin de cumplir el objetivo general planteado.

Para ello se elaboró una tabla en la que se indica todas las variables involucradas dentro de la etapa experimental.

TABLA 2.1.
Variables involucradas en la experimentación

EXPERIMENTO	Var. Independiente.	Niv. de Variación	Var. Dependiente.	Var. de Respuesta.
Validación de termopares.	Tiempo		Temperatura	
Caracterización del horno	Tiempo Zona de trabajo	5	Temperatura	
Obtención de α y Q_0 . Gel	Tiempo Color	3	Temperatura	-Coeficiente de atenuación.
Bisquets	Tiempo Empaque Potencia	1 2	Temperatura	-Calor generado
Constante dieléctrica.	Tiempo Temperatura	4	Intensidad de corriente.	-Constante dieléctrica.
Tangente de pérdida.	Resistencia Temperatura	10 4	Voltaje	-Tangente de pérdida.

2.2.1. Primera etapa.

En esta etapa se validaron los instrumentos de medición (termopares) dentro y fuera de la cavidad del horno, se caracterizó el equipo y se elaboraron placas de gel de grenetina a diferentes colores, utilizando como colorante anilina, con el fin de analizar y evaluar la relación del calor generado con la distribución de calor dentro de un producto.

2.2.1.1. Validación de termopares.

Los instrumentos que se validaron fueron termopares de cromel-alumel de 2 mm de diámetro. Las pruebas de validación que se realizaron fueron:

a) Repetibilidad.

Se hicieron mediciones de temperatura con los termopares en 4 diferentes lapsos de tiempo, tomando como referencia el punto de ebullición del agua.

b) Precisión.

Se realizaron 10 mediciones de temperatura en cada termopar, tomando el punto de ebullición como referencia.

c) Linealidad.

Esta prueba se realizó fuera y dentro del horno. Las otras pruebas no se consideraron porque era difícil visualizar en que momento ebulle el agua. Para la realización de la prueba fuera del horno se calentó el agua hasta llegar a una temperatura de 90° C y a partir de este valor se fue midiendo el enfriamiento del agua a intervalos de tiempo constantes. Adentro del horno la prueba se realizó calentando el agua, a la cual se midió la temperatura a intervalos de tiempo constantes

Las técnicas estadísticas que se emplearon se muestran en la tabla 2.2.

TABLA 2.2.
Técnicas estadísticas empleadas en la validación de termopares

PRUEBA	TECNICA
Precisión	Coefficiente de variación.
Repetibilidad	ANOVA $\alpha = 0.05$ (Análisis de Varianza) Diseño experimental de 4 bloques aleatorios.
Linealidad	Análisis de Regresión Lineal.

Es importante señalar que todos los análisis estadísticos se realizaron con el paquete **STATGRAPHICS Corp. Versión 3.0.**

Con los datos obtenidos fue seleccionado el termopar patrón, considerando como criterio de jerarquía Linearidad, ya que fue la prueba que se realizó fuera y dentro del horno y precisión.

Se establecieron ecuaciones de corrección de temperatura para los termopares mediante análisis de regresión lineal, tomando como base el termopar patrón; para ello se tomaron los datos obtenidos en la prueba de validación de Linearidad, considerando las temperaturas de los termopares sin corregir en las abscisas y como ordenadas las temperaturas del termopar patrón, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$T_c = mT_{ic} + b$$

2.1.

2.2.1.2. Caracterización del equipo.

Como equipo se empleó un horno de microondas marca TOSHIBA, con las siguientes características:

Fuente de poder: 120 V, con 60 Hz de frecuencia, trabajando sólo con corriente alterna.

Salida de potencia: 72 a 720 W (1 a 10 niveles de variación de potencia)

Frecuencia del horno: 2450 MHz.

Dimensiones de la cavidad: 22 x 35 x 35 cm.

Límite máximo de carga: 4.5 kg.

El horno se muestra en la figura 2.2.

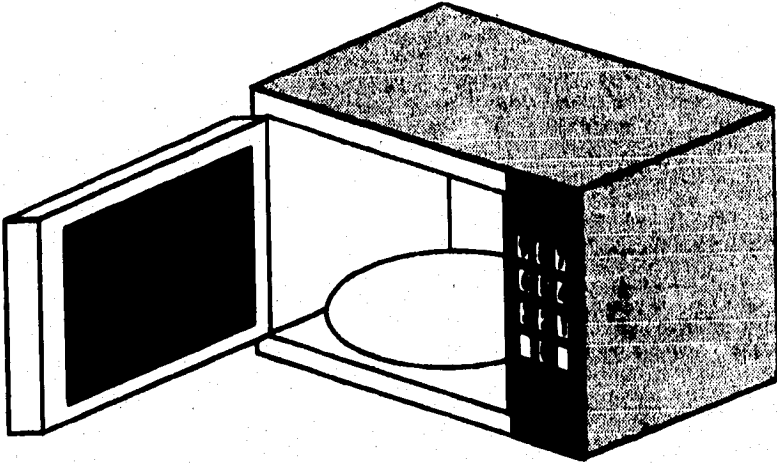


Figura 2.2.
Horno de Microondas

1) Evaluación del tiempo del ciclo de encendido y apagado del magnetrón.

La caracterización del equipo se realizó con agua, tomando tiempos de acuerdo al ciclo de encendido y apagado del magnetrón en un tiempo de 2 minutos. La medición se realizó para los 10 niveles de potencia (72 W a 720 W.).

Los tiempos del ciclo de encendido y apagado del magnetrón se midieron en el reloj del horno de microondas durante 2 minutos de la siguiente forma.

- a) El tiempo que duraba el magnetrón encendido se calculó restando el tiempo que marcó el reloj del horno cuando encendió el magnetrón con el tiempo de apagado.
- b) El tiempo que duraba apagado el magnetrón se evaluó restando el tiempo que marcó el reloj cuando se apagó el magnetrón con el tiempo que marcó en el momento que se volvía a encender.
- c) El tiempo total del ciclo se calculó sumando el tiempo de encendido del magnetrón con el tiempo de apagado.

2) Localización de "zona caliente".

Así mismo se localizó la zona en la que se trabajó ("zona caliente"), empleando agua para las mediciones. Se dividió la cavidad del horno en 8 partes y por números aleatorios se seleccionaron 5 (figura 2.3.)

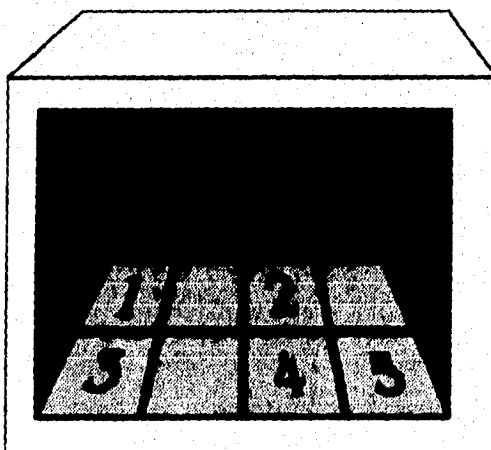


Figura 2.3.
Posiciones para determinar "zona caliente"

Se realizaron mediciones de temperatura con respecto al tiempo para cada posición a los niveles de potencia 1 y 3 (72 W y 216 W), las cuales se graficaron y se analizaron estadísticamente por ANOVA y prueba de TUKEY con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. El tiempo se considero como covariable.

2.2.1.3. Determinación del tiempo máximo de calentamiento del gel.

Como producto para evaluar la relación del calor absorbido con la distribución de calor se emplearon 3 lotes de gel de grenetina al 10% en placas de 10 x 6 x 1.5 cm., teniendo para cada una de ellas una intensidad de color diferente (s/color, gris y negro) en las que se

empleó como colorante anilina. Los geles se mantuvieron a una temperatura de 5°C durante 24 h.

Se utilizaron geles porque su estructura no es tan compleja como la de la mayoría de los alimentos, además su proceso de elaboración es muy rápido, pudiendo hacer varias muestras en un corto tiempo. La anilina se utilizó porque probablemente un colorante natural no hubiera reaccionado con la grenetina.

Para establecer el tiempo máximo de calentamiento en cada lote de gel, se consideró como parámetro de referencia el cambio de estado de gel a sol de toda la placa, el cual se pudo notar visualmente.

La finalidad de tomar como parámetro el cambio de gel a sol es que debido a la interacción de la anilina con la grenetina las estructuras de los geles fueron diferentes, por lo que se tuvo que romper totalmente los enlaces formados mediante calor y poder con esto analizar el comportamiento térmico en todos los lotes de gel bajo un mismo criterio.

Los datos obtenidos se graficaron para determinar la relación del tiempo máximo de calentamiento con respecto al color del gel.

2.2.1.4. Localización del punto térmico (punto frío) del gel.

El punto térmico se determinó (punto frío), realizando mediciones de temperatura con respecto al tiempo a 1 nivel de potencia (72 W), considerando 3 acomodos distintos y con un total de 15 posiciones analizadas, como se muestra en la figura 2.4.

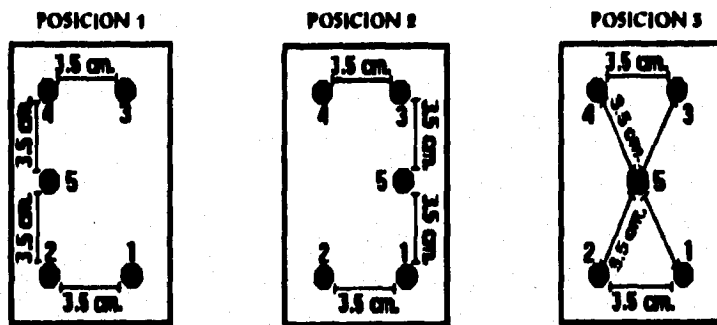


Figura 2.4.

Posiciones de los termopares para localizar el punto frío del gel

Los datos de temperaturas se graficaron con respecto al tiempo y se analizaron para seleccionar el punto frío.

2.2.1.5 Obtención del coeficiente de difusividad térmica y calor generado.

Una vez localizado el punto térmico y determinado el tiempo máximo de calentamiento se sometió cada lote al proceso de calentamiento por triplicado (realizando mediciones de temperatura con respecto al tiempo). Debido a que hubo variaciones entre las repeticiones, los datos se analizaron estadísticamente por ANOVA y prueba de TUKEY, porque con ello se seleccionaron los datos que se consideraron en el tratamiento de datos. El nivel de significancia fue de 0.05 y el tiempo se consideró como covariable.

Se seleccionaron los datos y se obtuvo la media aritmética.

Para evaluar la influencia del cambio de color en el comportamiento térmico se graficaron los datos de temperatura con respecto al tiempo para cada gel y se analizaron por ANOVA y prueba de TUKEY considerando el tiempo como covariable y un nivel de significancia de 0.05. A los datos que presentaron cambios bruscos de temperatura más notorios se les aplicó la TRANSFORMADA DE FOURIER⁽⁶⁾ y se analizó el efecto mostrado.

Para obtener el coeficiente de difusividad térmica (α) y calor generado (Q_0), se estableció un balance de energía en el que se consideran los fenómenos de transferencia de calor involucrados, que para este caso son la conducción y la radiación por microondas en estado no estacionario, por lo que según ^(4,14) la siguiente ecuación describe dicho comportamiento.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha v^2 T + \frac{Q_0}{\rho Cp}$$

2.2.

Se aplicó el método de diferencias finitas explícito y resuelto para el caso particular, mediante un programa de cómputo, se graficaron los datos de $\frac{\delta T}{\delta t}$ contra $v^2 T$, en que la pendiente (m) es respuesta a α y $\frac{Q_0}{\rho Cp}$ la ordenada al origen (b).

Para obtener el valor de Q_0 fue necesario evaluar los valores de densidad (ρ) y el calor específico (Cp). La primera se obtuvo experimentalmente por relación masa volumen y la segunda mediante la siguiente ecuación.

$$Cp = 2.094(X_{grasa}) + 1.256(X_{sólido}) + 4.187(X_{agua})$$

2.3.

Una vez conocidos ρ , Cp , y el valor de b , Q_0 se evaluó mediante la siguiente ecuación:

$$Q_0 = b \rho Cp$$

2.4.

Los valores de calor generado y difusividad térmica se graficaron con respecto al color del gel y se analizaron.

2.2.2. Segunda etapa.

Para evaluar las velocidades de calentamiento se hornearon bisquets envasados en un recipiente de Poliestireno expandido mejor conocido como "unicel" y empacados con diferentes materiales de cobertura (polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno/papel encerado

(LDPE/EN), polietileno/aluminio/papel encerado (LDPE/A/EN)). Los envases y materiales de cobertura fueron seleccionados de acuerdo a las características que se revisaron en el punto 1.5.2. y a la disponibilidad en el mercado. Así mismo se realizó un análisis comparativo entre los calores absorbidos obtenidos en el bisquet con los materiales de cobertura y los de las placas de gel a diferentes intensidad de color, seleccionando con esto el más adecuado.

2.2.2.1. Formulación y proceso de elaboración del bisquet.

En cuanto a la formulación empleada durante la experimentación, se utilizó como base la siguiente formulación ⁽⁸¹⁾:

TABLA 2.3.

Formulación base para elaborar bisquet

INGREDIENTES	CANTIDADES (g)
Harina	250
Margarina	125
Azúcar	30
Sal	5
Royal	12.5
Leche	40 ml
Huevo	1 pieza

Con esta formulación se procedió a realizar las pruebas de horneado preliminares, para lo cual se llevó a cabo el siguiente proceso de elaboración:

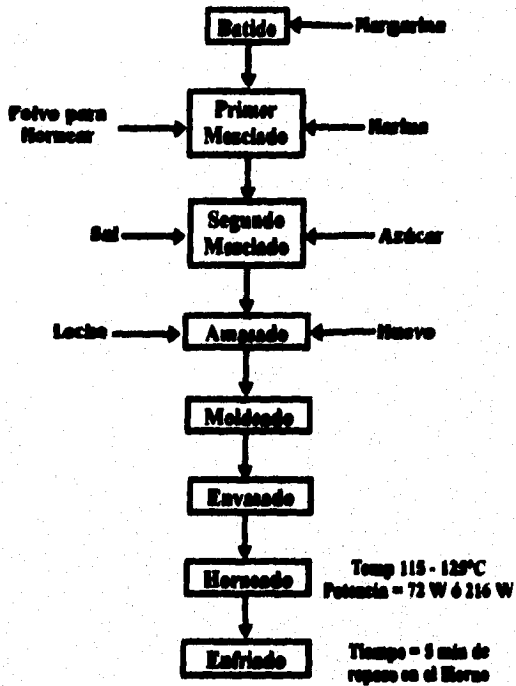


Figura 2.5.

Diagrama de proceso de elaboración de bisquet.

La descripción del diagrama se muestra a continuación:

BATIDO. En una superficie plana se colocó la margarina y se batió con un tenedor hasta que se obtuvo una consistencia cremosa.

PRIMER MEZCLADO. Se incorporó la harina y el polvo de hornear con la margarina y se mezcló hasta obtener una consistencia arenosa.

SEGUNDO MEZCLADO. Se adicionó el azúcar y la sal y se mezcló.

AMASADO. Se incorporó el huevo y la leche hasta formar una masa. Se amasó manualmente la pasta con el fin de desarrollar el gluten y obtener una masa no pegajosa y elástica.

MOLDEADO. Con un rodillo se estiró la masa y con un molde redondo se cortó. En la parte superior se formó un círculo concéntrico. Se barnizó con yema de huevo, previamente coloreada con tintura, para dar una tonalidad más fuerte al color de la yema. Esto es con el fin de que al terminar el proceso de horneado en el microondas no se obtuviera un producto blanqueado con apariencia de no estar cocido.

ENVAJADO. Se acomodaron los blaquets en una charola y se empacaron con un material de cobertura en la superficie.

HORNEADO. Se colocó la charola en el horno de microondas y se hornearon a potencia 1 (72 W) y 3 (216 W) hasta obtener una temperatura de 115°C a 125°C. Se tomó como base ésta temperatura porque, como se mencionó en el punto 1.2.4., a temperaturas mayores la evaporación del agua es mayor por lo que el producto podría secarse demasiado, debido a que las microondas penetran hacia el interior del alimento rápidamente alcanzándose altos valores de temperatura en corto tiempo, por lo que difícilmente se logra la formación de costra y el dorado de la superficie.

ENFRIADO. Se deja reposar en el horno por un tiempo de 5 minutos aproximadamente y se sacan para que terminen de enfriar a temperatura ambiente.

Una vez realizadas las pruebas de horneado con esta formulación, se obtuvo un bisquet desmoronable con sabor amargo, por lo que se optó en aumentar la cantidad de margarina para mejorar la consistencia y disminuir el polvo de hornear con el fin de contrarrestar el sabor amargo

Se varió la cantidad de margarina aumentándola en una proporción del 4 % con respecto a la formulación anterior hasta llegar a 5 porciones diferentes. Para el polvo de hornear se disminuyó en una proporción similar a la de la margarina.

Se realizaron 10 pruebas de horneado a un nivel de potencia 3 (226 W) a un tiempo aproximado de 2.5 minutos; cabe aclarar que el tiempo se determinó empíricamente, observando a través de la puerta del horno, porque el proceso se llevó a cabo con el plato giratorio del horno y por tal motivo no pueden colocarse los termopares. A los productos

obtenidos se les realizó pruebas organolépticas (sabor, textura, consistencia) con diferentes personas. Posteriormente se determinó la formulación a emplear.

2.2.2.2. Localización del punto térmico (punto frío) del bisquet.

Debido a que se tenía que considerar similitud en dimensiones de la placa de gel con el envase del bisquet, se buscó en el mercado un recipiente que se aproximara a tal condición y se encontraron charolas de "unicel" rectangulares de 20 x 13.5 x 2.0 cm, que equivale aproximadamente el doble con respecto a las de las placas de gel.

Se elaboraron 4 lotes de bisquets de 4.2 cm. de diámetro y 1 cm. de espesor envasados en unicel, empleando para 3 de ellos diferentes materiales de cobertura (LDPE, LDPE/EN y LDPE/A/EN), el otro lote se trabajó sin material de cobertura.

El punto frío se determinó, realizando mediciones de temperatura con respecto al tiempo a 1 nivel de potencia (72 W), considerando 3 acomodos distintos y con un total de 15 posiciones analizadas, como se muestra en la figura 2.3. Las posiciones en las que se realizaron las mediciones de temperatura fueron iguales que en las placas de gel, la diferencia fue la distancia de los nodos. Cabe aclarar que las posiciones 1 y 2 se analizaron de igual forma que en el gel y de los resultados obtenidos se estableció la tercera posición.

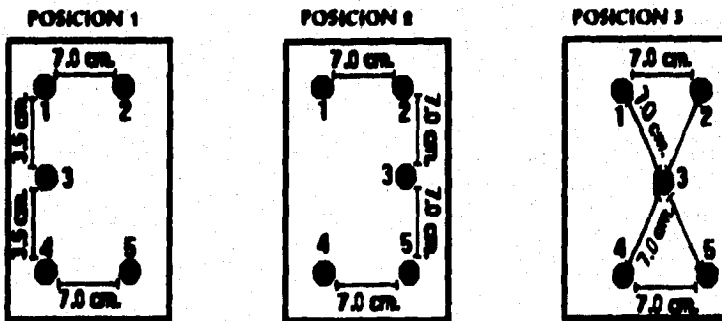


Figura 2.3.

Posición de los termopares para la localización del punto frío del bisquet.

Con los datos obtenidos se graficó la temperatura respecto al tiempo y se analizaron para seleccionar el punto térmico.

2.2.2.3. Determinación del tiempo máximo de calentamiento.

El tiempo máximo se obtuvo para cada lote a las potencias 1 (72 W) y 3 (216 W), tomando como referencia una temperatura de cocción de 115°C a 125°C. Los datos obtenidos se graficaron para analizar la relación del tiempo de cocción con los diferentes empaques. Dentro de este análisis se realizó una comparación con los resultados obtenidos en las placas de gel.

2.2.2.4. Obtención de α y Q_0 .

Localizado el punto térmico y determinado el tiempo máximo de horneado del bisquet cuando alcanza una temperatura de 115°C a 125°C, se sometió cada lote al proceso de calentamiento, realizando mediciones por triplicado de temperatura con respecto al tiempo a las potencias 1 (72 W) y 3 (216 W). Las replicas se analizaron por ANOVA y prueba de TUKEY, considerando el tiempo como covariable. El nivel de significancia fue de 0.05.

Del análisis se seleccionaron los datos y se obtuvo la media aritmética.

Para determinar la influencia del empaque y la potencia en el comportamiento térmico, con los datos obtenidos se elaboraron gráficas de temperatura con respecto al tiempo y se analizaron por ANOVA con prueba de TUKEY a un nivel de significancia de 0.05, considerando el tiempo como covariable. Así mismo se realizó un análisis comparativo con los resultados obtenidos en los lotes de gel.

Para determinar la influencia que ejercen el empaque y la potencia en el comportamiento térmico se diseñó un experimento multifactorial de 4x2 niveles de variación. Los datos se analizaron por ANOVA y prueba de TUKEY, considerando el tiempo como covariable. El nivel de significancia fue de 0.05.

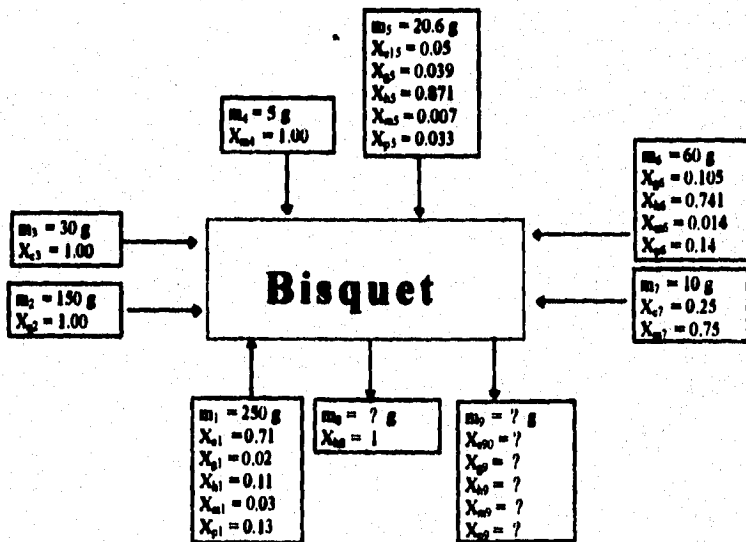
El α y Q_0 se obtuvo, al igual que en las placas de gel, basándose en la ρ Cp

ecuación 2.2 y graficando los datos de $\frac{\delta T}{\delta t}$ contra $v^2 T$,

Para conocer el valor de Q_0 se evaluó por relación masa - volumen ρ de la masa sin hornear y la del bisquet y se obtuvo la media aritmética para poder realizar los cálculos correspondientes.

Para el cálculo de C_p , al igual que en el gel, se empleó la ecuación 2.3, por lo que era necesario conocer la composición química de la masa sin hornear y del bisquet. Como no se tenían datos bibliográficos se realizaron varias pruebas para saber que cantidad de agua se perdía después de hornear la masa. Esto se hizo tomando el peso de la masa antes de hornear y al bisquet y por diferencia de peso se calculó la cantidad de agua evaporada.

Con los valores de composiciones químicas de los ingredientes empleados en la formulación de bisquet, obtenidos por bibliografía⁽²⁸⁾ y el dato de cantidad de agua evaporada después de hornear la masa, se planteó el siguiente balance de materia:



m_1 - Harina	m_8 - Agua evaporada
m_2 - Mantequilla	m_9 - Bisquet
m_3 - Azúcar	X_c - Fracción de carbohidratos
m_4 - Sal	X_g - Fracción de grasas
m_5 - Leche	X_h - Fracción de humedad
m_6 - Huevo	X_m - Fracción de vitaminas y minerales
m_7 - Polvo de hornear	X_p - Fracción de proteínas

Una vez resuelto el balance se calculó la composición química de la masa sin hornear y del bisquet. Con estos datos se calculó el C_p para ambos y se obtuvo la media aritmética, la cual se empleó en el cálculo de Q_0 , según la ecuación 2.4.

Los valores de α y Q_0 se graficaron con respecto a los diferentes empaques a las potencias de 72 W y 216 W, realizando un análisis comparativo con los lotes de gel.

De los análisis comparativos entre los lotes de gel y los materiales de película de los empaques, se seleccionó el empaque más adecuado para hornear bisquets.

2.2.3. Tercera etapa.

Uno de los problemas con este tipo de procesos lo representan las propiedades dieléctricas de los materiales, de manera que en esta etapa se obtuvo el coeficiente de atenuación (α') y profundidad de penetración (D_p) a partir de la constante dieléctrica (K') y tangente de pérdida ($\tan \delta$) para 4 temperaturas 55 °C, 70 °C, 90 °C y 120 °C.

2.2.3.1. Evaluación de K' .

Se apoyó en el experimento de Faraday⁽⁴⁴⁾ para evaluar la constante dieléctrica se construyó un capacitor de placas paralelas de 4.5 cm por lado con 1 cm. de separación, empleando como dieléctrico bisquet a diferentes temperaturas, 55 °C, 70 °C, 90 °C y 120 °C.

Para construir el capacitor se armó un dispositivo R - C (Resistencia - Capacitancia), empleando una resistencia de 1000 Ω . (Figura 2.7.)

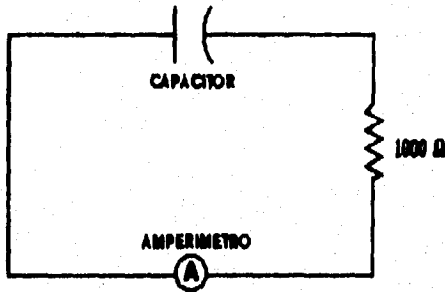


Figura 8.7.
Circuito de tipo R-C

Se colocó el dieléctrico en el capacitor y se cargó con una pila cuyo voltaje fue de 6 V. El tiempo que se estuvo cargando el dieléctrico fue de 2 minutos aproximadamente. El valor de la resistencia y el voltaje no influyen en el valor de la pendiente a obtener por lo que se seleccionaron aleatoriamente.

Posteriormente se tomaron lecturas de intensidad de corriente con respecto al tiempo al descargarse el dieléctrico, realizando tres repeticiones de las cuales se obtuvo la media aritmética. El comportamiento se da por la siguiente ecuación 2.5.

$$\frac{i}{i_0} = e^{\left(\frac{-1}{RC}\right) t}$$

2.5.

Se graficó el $\ln(i_0/i)$ contra el tiempo y se obtuvo la pendiente por regresión lineal.

$$m = \frac{1}{RC}$$

2.6

De este valor se despejó C y empleando la ecuación que se aplica a placas paralelas del capacitor, se obtiene K'.

$$C = \epsilon_0 K' \frac{A}{L}$$

2.1

L= La relación área/distancia de separación de las placas (0.0020 m.)

Una vez obtenidos los datos se graficó K' con respecto a la temperatura.

2.2.3.2. Evaluación de tan δ .

Como se revisó en el punto 1.3.3, la tan δ también es conocida como factor de disipación y que físicamente representa la relación de la habilidad de los materiales a disipar la energía eléctrica al convertirla en calor entre la capacidad de almacenamiento. Por consiguiente en términos eléctricos la tan δ representa la conductancia (G) entre la capacitancia (C).

$$\tan \delta = \frac{G}{C}$$

2.2

Debido a que G es la inversa de la resistencia para ser medido se usó una fuente de impedancia variable en el puente de Wheatstone ⁽¹⁰⁾ en el que se usó el modelo de puente alterno (Figura 2.17).

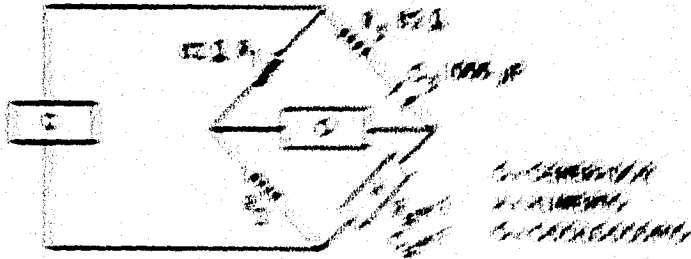


Figura 2.17

Este diagrama muestra un puente de Wheatstone alterno utilizado para medir la impedancia de un elemento desconocido.

El puente de Wheatstone alterno se utiliza para medir la impedancia de un elemento desconocido.

GENERADOR

Nombre: Sweep function generator.

Modelo: G305.

Rango de medición: 1Hz-1 MHz.

Características: Salida de respuesta de señal cuadrada, triangular y sinusoidal.

OSCILOSCOPIO

Marca: Gold Star.

Modelo: 05-9020A.

Rango: 1 Hz - 20 MHz.

Características: Doble trazo.

El experimento consistió en ajustar los valores de la R_1 , R_2 y R_3 para obtener una salida de voltaje cero o prácticamente salida mínima, de tal forma que no hubiera corriente dentro del puente. La condición de salida nula fue:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

2.9.

La Z representa la impedancia.

Con ello se fijó la R_1 y R_3 y se varió la R_2 a diferentes valores, tomando los datos de voltaje correspondientes a una frecuencia de 35,000 Hz, con el fin de graficar y extrapolar a voltaje cero el valor de la R_2 . Esto se hizo a diferentes temperaturas 55°C, 70°C 90 °C y 120°C. Previamente se hicieron 5 mediciones de voltaje variando la frecuencia de 5000 Hz hasta 100,000 Hz., pero la respuesta fue la misma por lo que se optó en mantenerla constante. Probablemente a frecuencias por arriba de 1 mega de Hz si haya variaciones, sin embargo no se pudo visualizar la respuesta de señal en el osciloscopio por parte del generador a frecuencias mayores a 100,000 Hz.

Debido a la estructura del alimento, éste se comporta como un circuito en serie y en paralelo por lo que es necesario plantear las ecuaciones de Z tanto en serie como en paralelo.

Los valores de Z_1 , Z_2 y Z_3 se plantearon como circuito en serie:

$$Z_1 = R_1$$

2.10.

$$Z_2 = R_2$$

2.11.

$$Z_3 = R_3 + \frac{1}{i \omega C_3}$$

2.12.

Como Z_4 corresponde al alimento se planteó la ecuación en serie como:

$$Z_4 = R_4 + \frac{1}{i \omega C_4}$$

2.13.

Y en paralelo se consideró Z_4 como:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + i \omega C$$

2.14.

$$\omega = 2\pi f$$

Tomando en cuenta que Z_4 tiene que ser igual a Z , las ecuaciones 2.13. y 2.14. resueltas, según ^(12, 48), son:

$$R = \frac{1}{\omega^2 R_4 C_4^2} + R_4$$

2.15.

$$C = \frac{\omega C_4}{1 + \omega^2 R_4^2 C_4^2}$$

2.16.

Las ecuaciones 2.15. y 2.16. se sustituyeron en la ecuación 2.8., obteniéndose:

$$\tan \delta = \omega R_4 C_4$$

El valor de R_1 se obtuvo sustituyendo las ecuaciones 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13 en la ecuación 2.8 y despejando R_1 .

Las mediciones se realizaron por triplicado para cada temperatura y en promedio se tomaron 5 mediciones.

Para el caso de C_1 , se sustituye la ecuación 2.10, con sustitución de R_1 en la ecuación 2.8, obteniendo la ecuación 2.14.

$$2.14 = 2.14, R_1, R_2$$

El valor de C_1 se obtuvo de:

Las mediciones se realizaron por triplicado para cada temperatura y en promedio se tomaron 5 mediciones.

El valor de C_2 se obtuvo de:

El valor de C_3 se obtuvo de:

Las mediciones se realizaron por triplicado para cada temperatura y en promedio se tomaron 5 mediciones.

El valor de C_4 se obtuvo de:

$$2.15 = 2.15, R_1, R_2, R_3, R_4$$

El valor de C_5 se obtuvo de:

Las mediciones se realizaron por triplicado para cada temperatura y en promedio se tomaron 5 mediciones.

2.17.

El valor de R_4 se obtuvo sustituyendo las ecuaciones 2.10., 2.11., 2.12. y 2.13. en la ecuación 2.9. y despejando R_4 .

Las mediciones se realizaron por triplicado para cada temperatura y se obtuvo la media aritmética.

Para el caso de C_4 , se sustituye la ecuación $C = K' \epsilon_0$, que relaciona el capacitor con la constante dieléctrica, revisada en el punto 1.3.1.

$$\tan \delta = 2\pi f R_4 K' \epsilon_0$$

2.18

El valor de ϵ_0 es 8.85×10^{-12} .

La frecuencia que se involucró en este caso fue la del horno de microondas, ya que de esta forma se trató de dar una aproximación al valor real de la $\tan \delta$.

El valor de la $\tan \delta$ se calculó para los 4 valores de temperatura.

2.3.3.3. Cálculo de α' y D_p .

Una vez conocidos K' y $\tan \delta$ se calculó la profundidad de penetración (D_p) y el coeficiente de atenuación (α') mediante las ecuaciones 1.22. y 1.23. :

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi} \sqrt{K' \sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1}$$

$$\alpha' = \frac{1}{D_p}$$

El valor de D_p se graficó con respecto a la temperatura y se aplicó un análisis de regresión lineal con el fin de obtener una ecuación que prediga diferentes valores de D_p . Esta ecuación fue de utilidad en el programa de computo que se elaboró en la cuarta etapa.

2.2.6. Cuarta etapa.

En la cuarta etapa se elaboró un programa de computo en Lenguaje Pascal^(23, 24) que predice tiempos de proceso de calentamiento por microondas para alimentos en forma de placa, indicándose para ello una temperatura límite.

La finalidad del programa es poder optimizar condiciones de proceso en la elaboración de Bisquet, tales como dimensiones del empaque y potencia del horno, para obtener una mejor uniformidad de calentamiento en el menor tiempo posible.

2.2.4.1. Balances de energía del proceso de microondas

Para la elaboración del programa se tuvo que plantear balances de energía, siguiendo para la resolución de las ecuaciones el método de diferencias finitas explícito para coordenadas rectangulares.

Considerando el sistema en dos direcciones las ecuaciones para el perfil tiempo-temperatura queda, según la figura 2.9.:

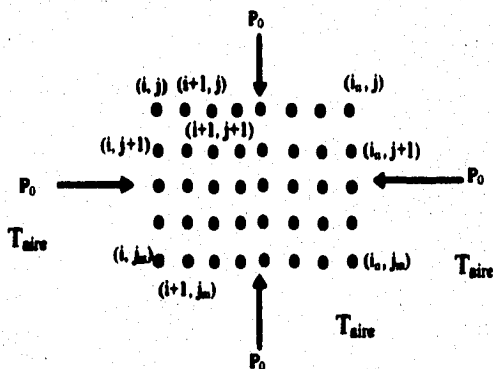


Figura 2.9.
Posición de los nodos.

1) *Nodos esquina.*

$$\frac{h}{\Delta x} (T_a - T_{i,j}) + \frac{k}{\Delta x^2} (T_{i+1,j} - T_{i,j} + T_{i,j+1} - T_{i,j}) + \frac{1}{\Delta x} (Q_{i,j}) = \frac{\rho Cp}{\delta t} (T_{i,j}^{i+\Delta t} - T_{i,j}^i)$$

2.19.

Despejando $T_{i,j}^{i+\Delta t}$ de la ecuación 2.19 se tiene:

$$\frac{h\delta t}{\Delta x \rho Cp} (T_a - T_{i,j}) + \frac{k\delta t}{\Delta x^2 \rho Cp} (T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}) + \frac{\delta t}{\Delta x \rho Cp} (Q_{i,j}) + T_{i,j}^i = (T_{i,j}^{i+\Delta t})$$

Como $Fo = \frac{\Delta t k}{\Delta x^2 \rho Cp}$ y haciendo $\Omega = \frac{\Delta t}{\Delta x \rho Cp}$

Por lo que la ecuación 2.19 queda:

$$h\Omega (T_a - T_{i,j}) + Fo (T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}) + \Omega (Q_{i,j}) + T_{i,j}^i = (T_{i,j}^{i+\Delta t})$$

2.20.

Esta ecuación se aplica a las 4 esquinas.

Para comprender como se va a calcular el $Q_{i,j}$ hay que recordar que la potencia absorbida por microondas está dada por la ecuación :

$$P_x = P_{inc} e^{-2Da/Dp}$$

Se estableció que el calor se iba a absorber en la siguiente forma:

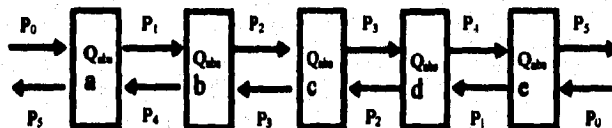


Figura 2.10.

Absorción de calor en la placa cuando se aplica microondas.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

En sentido derecho se tiene que:

$$P_1 = P_{0e}^{2D_r/D_p}$$

2.21.

Por lo que el calor absorbido $Q_{abs} = P_0 - P_1$.

Para el caso de P_2 ahora la potencia incidente es P_1 .

En sentido inverso el $Q_{abs} = P_1 - P_2$.

Por consiguiente el Q_{abs} en una dirección es:

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2}$$

2.22

Pero como el sistema es en dos direcciones, entonces el Q queda:

$$Q_{ij} = Q_{i-1} + Q_{i-2} + Q_{i-1} + Q_{i-2}$$

2.23.

2) Nodos orilla.

a) Orilla en "I"

$$\frac{h}{\Delta x} (T_0 - T_{i+1,j}) + \frac{k}{\Delta x^2} (T_{i,j} - T_{i-1,j} + T_{i+2,j} - T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - T_{i-1,j}) + \frac{1}{\Delta x} (Q_{i,j}) = \frac{\rho C_p}{\delta t} (T_{i,j}^{i+\Delta t} - T_{i,j}^i)$$

2.24.

Reacomodando la ecuación 2.24.

$$h\Omega (T_0 - T_{i+1,j}) + Fo (T_{i,j} - 3T_{i-1,j} + T_{i-2,j} + T_{i+1,j-1}) + \Omega (Q_{i,j}) + T_{i,j}^i = (T_{i,j}^{i+\Delta t})$$

2.25.

b) Orilla en "j".

$$\frac{h}{\Delta x} (T_s - T_{i,j+1}) + \frac{k}{\Delta x^2} (T_{i,j} - T_{i,j+1} + T_{i,j+2} - T_{i,j+1} + T_{i,j+1} - T_{i,j+1}) + \frac{1}{\Delta x} (Q_{i,j}) = \frac{\rho C_p}{\delta t} (T_{i,j}^{i+\Delta t} - T_{i,j}^i)$$

Reordenando la ecuación 2.26.

2.26.

$$h\Omega (T_s - T_{i,j+1}) + Fo (T_{i,j} - 3T_{i,j+1} + T_{i,j+2} + T_{i,j+1}) + \Omega (Q_{i,j}) + T_{i,j}^i = (T_{i,j}^{i+\Delta t})$$

2.27.

3) Nodos internos.

$$\frac{k}{\Delta x^2} (T_{i,j+1} - T_{i,j+1} + T_{i,j+1} - T_{i,j+1} + T_{i,j} - T_{i,j+1} + T_{i,j+1} - T_{i,j+1}) + \frac{1}{\Delta x} (Q_{i,j}) = \frac{\rho C_p}{\delta t} (T_{i,j}^{i+\Delta t} - T_{i,j}^i)$$

Reordenando la ecuación 2.28.

2.28.

$$Fo (T_{i,j+1} - 4T_{i,j+1} + T_{i,j+1} + T_{i,j+1} + T_{i,j+1}) + \Omega (Q_{i,j}) + T_{i,j}^i = (T_{i,j}^{i+\Delta t})$$

2.29.

Como se observa en las ecuaciones 2.20., 2.25., 2.27. y 2.29, en el término Ω se involucra un intervalo de tiempo Δt , por lo que conociendo la temperatura máxima de proceso se pudo calcular el tiempo.

2.2.4.2. Elaboración del programa de computo para optimizar las condiciones de proceso.

1) Diagrama de Flujo.

La figura 2.11. muestra el diagrama de flujo del programa.

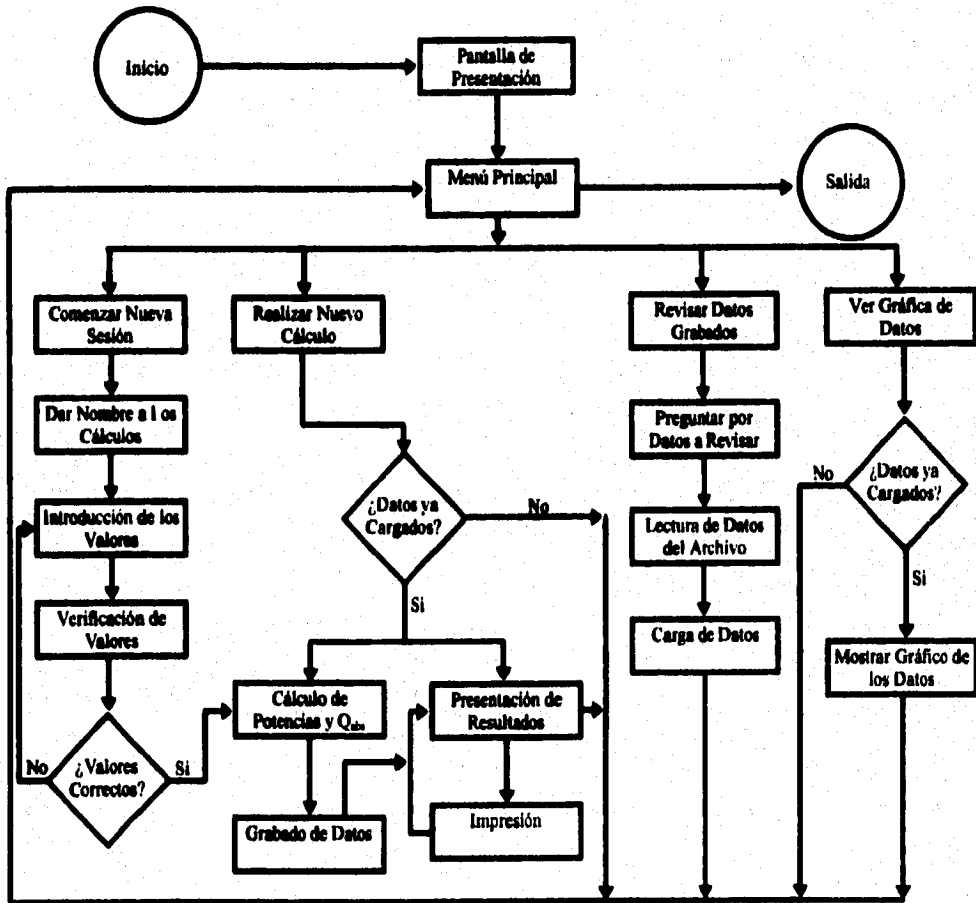


Figura 2.11. Diagrama de Flujo del Programa

2) Condiciones para ejecutar el programa.

El programa es autoejecutable y se corre con el nombre OVEN.

Para dar una mayor ayuda al usuario del funcionamiento del programa se elaboró un archivo en código ASCII con el nombre LEEME.TXT donde se explica como es el funcionamiento del programa, el cual se muestra a continuación:

El programa compilado muestra al inicio del mismo un menú de opciones con el cual el usuario podrá seleccionar cualquiera de acuerdo a sus necesidades o a los datos ya registrados. El programa inicialmente sólo podrá trabajar en la opción "Comenzar Nueva Sesión", puesto que al no existir datos procesados no se podrán utilizar las otras opciones. Cuando trabajamos con esta opción, será necesario darle un nombre al proceso a realizar, con lo cual podremos posteriormente identificarlo; enseguida se deberá de indicar cuáles son las condiciones operantes, como:

Tinicial del alimento ($^{\circ}\text{C}$)
Thorno ($^{\circ}\text{C}$)
Coeficiente convectivo ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)
Tfinal del alimento ($^{\circ}\text{C}$)
Profundidad de penetración l (m)
Potencia incidente (W/m^2)
Número de Fo
Número de nodos (en x)
Largo del alimento (m)
Ancho del alimento (m)
Densidad (kg/m^3)
Calor específico ($\text{J}/\text{s kg }^{\circ}\text{C}$)
Valor de la pendiente para Dp
Valor de la ordenada para Dp

Si se ha omitido la inserción de cualquiera de los valores requeridos por el programa, este volverá a requerir nuevamente el o los valores faltantes; asimismo si alguno de los valores insertados es incorrecto, es posible corregirlo antes de proceder a los cálculos posteriores.

Se calculan primero las potencias que inciden dentro de cada nodo teórico (que es establecido por el usuario), para posteriormente en base a estas potencias calcular el calor absorbido dentro del alimento. Una vez que el programa ha obtenido los valores de las potencias y el calor absorbido, calcula el tiempo de proceso basándose en la temperatura límite que ha fijado el usuario; utilizando ecuaciones tanto para nodos esquina, nodos orilla y nodos internos, obtiene los valores de temperatura en los mismos a un tiempo dado; en este punto, se calcula también el valor para la profundidad de penetración (D_p), el cual se usará posteriormente para un nuevo cálculo de Potencias; cuando en los nodos esquina se ha llegado a la temperatura límite se tendrá por consiguiente el tiempo en el que se llegó al mismo. El valor inicial que se introduce de D_p servirá para los cálculos del primer intervalo de tiempo, a partir del segundo intervalo se calcula el D_p mediante una ecuación logarítmica, para la cual se necesita un valor de pendiente y una ordenada. La ecuación se obtuvo para un rango de temperaturas de 55 a 125°C. Si el usuario no tiene valores de pendiente y ordenada, entonces el cálculo se realizará con el D_p inicial.

Conocido ya el tiempo necesario para el proceso, comienza la optimización de condiciones de proceso como la potencia del horno, las dimensiones del alimento y el tiempo de proceso. En la optimización la potencia incidente es constante y se considera un diferencial de temperatura de 10°C como máximo, con el fin de obtener valores que den al producto una mayor uniformidad de calentamiento.

Hecho lo anterior se registran los datos de temperatura y tiempo optimizados, los cuales podrán ser revisados por el usuario mediante las opciones "Revisar datos grabados" y "Ver Gráfica de Datos". La gráfica se muestra en 3 dimensiones mostrando los perfiles de temperaturas del alimento donde cada capa representa un intervalo de tiempo, observándose una menor temperatura en la parte central.

En la opción "Realizar nuevos cálculos", el usuario podrá modificar algunas de las condiciones establecidas en un proceso, dándole un nuevo nombre. A partir de estos datos se obtendrán resultados diferentes,

El programa se adaptó únicamente para monitores VGA, que son los que tienen mayor resolución; las gráficas en monitores CGA o EGA son difíciles de poder acomodar dentro de las coordenadas obtenidas por el programa.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANALISIS

3.1. Validación de termopares.

3.1.1. Repetibilidad.

Los resultados estadísticos de la prueba de repetibilidad se muestran en el ANEXO B en las tablas B1 a B5.

Debido a que α tenía que ser mayor a 0.05 para poder considerar que un termopar es repetible, los resultados de las tablas muestran que todos los termopares son repetibles excepto el termopar 3.

3.1.2. Precisión.

Los datos del coeficiente de variación obtenidos para cada termopar se muestran en la tabla 3.1.

TABLA 3.1.
Coeficientes de variación de los termopares

TERMOPAR	Coefficiente de variación (%)
1	0.322
2	0.310
3	1.067
4	0.272
5	0.319

En la tabla 3.1. se observa que el termopar de coeficiente de variación más bajo es el termopar 4, sin embargo los porcentajes obtenidos son muy bajos por lo que se considera que todos los termopares son precisos.

3.1.3. Linealidad.

En la tabla 3.2. se muestran los valores de coeficiente de correlación obtenidos fuera y dentro del horno.

TABLA 3.2.
Coeficientes de correlación de los termopares

TERMOPAR	Coef. de correl. Fuera del horno	Coef. de correl. Dentro del horno
1	0.973	0.984
2	0.975	0.968
3	0.974	0.990
4	0.975	0.984
5	0.976	0.986

En los datos se observa que tanto fuera como dentro del horno los coeficientes de correlación fueron altos, por lo que se considera que todos los termopares son lineales.

Debido a que todos los termopares cumplen con las pruebas de validación (excepto el termopar 3 en la prueba de repetibilidad), para poder seleccionar el termopar patrón se consideró el que presentó el coeficiente de variación más bajo y el que tuvo el coeficiente de correlación más alto. El termopar que cumplió esto fue el termopar 4, por lo que las ecuaciones de corrección para los otros termopares se muestran en la tabla 3.3.

TABLA 3.3.
Ecuaciones de corrección

Termopar	Ecuación
1	$0.984 T_1 + 0.598$
2	$0.986 T_2 + 0.194$
3	$0.918 T_3 + 1.025$
5	$1.006 T_5 - 1.043$

3.2. Caracterización del horno.

3.2.1. Tiempos del ciclo de encendido y apagado del horno.

Los tiempos de encendido y apagado del magnetrón se muestran en la tabla 3.4.

TABLA 3.4.
Tiempos de encendido y apagado del magnetrón

Potencia. (W)	Tiempo de encendido (s)	Tiempo de apagado (s)
72	3	14
114	5	12
216	6	11
288	8	9
360	10	7
432	11	6
504	13	4
576	14	3
648	16	1
720	17	0

De los valores obtenidos en la tabla 3.4. se determinó que el tiempo total del ciclo fue de 17 s. para las potencias 1 a 9 (72 a 648 W). En el caso de la potencia 10 (720 w) el magnetrón no se apaga ya que los 17 segundos está activado.

En la tabla 3.4 se observa que el tiempo no aumenta directamente proporcional a las potencias, por lo que se aplicó un análisis de regresión lineal a los datos, del cual se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.997, indicando con esto un comportamiento lineal con una pendiente de 1.9. La variación de los tiempos se debe probablemente a 2 razones, la primera es que el tiempo de incidencia de las microondas no sea el real ya que para que se pueda ajustar a los 17 s el aumento de tiempo para cada potencia debe ser menos de 2 segundos, por lo que se tendría que emplear un cronómetro con precisión de centésimas de segundo y la segunda es que el magnetrón se encuentre desajustado, ya que el horno constantemente se mueve para desarmarlo y colocar los termopares.

Esta tabla fue de utilidad para seleccionar la (s) potencia (s) con la (s) que se trabajó, así como determinar el intervalo de tiempo de las historias térmicas.

Las potencias que se eligieron fueron la 1 y 3 (en el modelo se utilizó sólo la potencia 1) porque a potencias mayores el tiempo de proceso es muy corto y por lo tanto los datos obtenidos no serían suficientes para poder realizar un análisis térmico extenso.

El intervalo de tiempo que se estableció fue de 17 s, tomando los datos de temperatura una vez que el reloj del horno marcará este intervalo de tiempo. La razón de considerar este intervalo de tiempo fue con el fin de analizar el efecto del ciclo de encendido y apagado del magnetrón en las temperaturas.

3.2.2. "Zona caliente".

Las gráficas obtenidas para cada zona se muestran en las figuras 3.1. y 3.2.

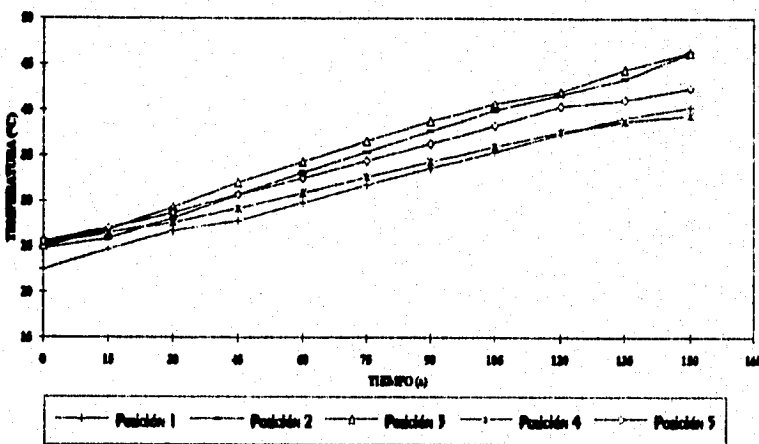


Figura 3.1.

Comportamiento térmico para determinar "zona caliente" a potencia de 72 W.

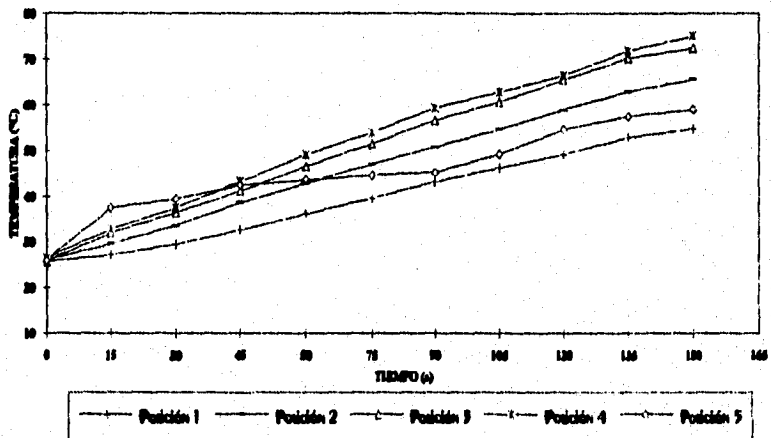


Figura 3.8.

Comportamiento térmico para determinar "zona caliente" a potencia de 816 W.

Como se observa en la figura 3.1. las posiciones 2 y 3 presentan los valores más altos de temperaturas, sin embargo las posiciones 1, 4 y 5 presentan poca diferencia con respecto a los 2 anteriores. En la figura 3.2. las posiciones que presentan los valores más altos son la 3 y 4, notándose una diferencia mayor de temperaturas con respecto a las otras. Como las gráficas no muestran claramente cual zona es la que presenta mayores valores de temperaturas, los datos se analizaron estadísticamente.

Los datos estadísticos se muestran en las tablas B6 y B7 y en las gráficas de valores media 1B y 2B del ANEXO B.

En la potencia de 72 W y la de 216 W se determinó que la zona de trabajo es altamente significativa con la temperatura, por lo que al graficar los valores medios de temperaturas con respecto a las posiciones se observó que la posición 3 presentó los valores más altos para las 2 potencias, por lo que ésta se seleccionó como "zona caliente" y fue en la que se trabajó durante toda la experimentación.

3.3. Tiempo máximo de calentamiento del gel.

El tiempo máximo de calentamiento de cada lote de gel se muestra en la tabla 3.3.

TABLA 3.3.
Tiempo máximo de calentamiento para cada gel

Color del gel.	Tiempo máximo de calentamiento (min)
Sin color	5.6
Gris	7.3
Negro	9.6

La relación de la variación del color del gel con el tiempo se muestra en la figura 3.3.

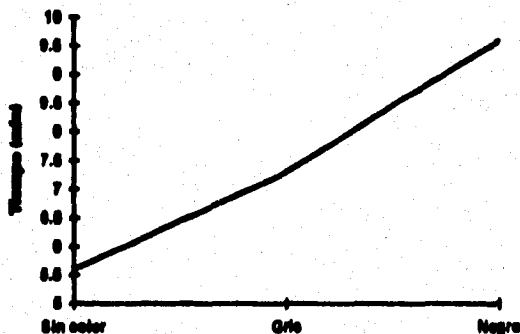


Figura 3.3.

Relación de la variación del color en el gel con el tiempo de proceso.

La figura 3.3. muestra una relación casi lineal al variar el color con el tiempo del cambio de estado de gel a sol.

Para poder comprender el porque de la variación de los tiempos de calentamiento de los geles, se tiene que el mecanismo de formación de la red tridimensional de la grenetina sin colorante (anilina) es el resultado de la interacción entre el grupo carboxilo terminal de la molécula de grenetina y del grupo amino terminal de la misma molécula, en donde también

debido a los puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals y posiblemente puentes disulfuros dan estabilidad a la estructura formada, como se muestra en la figura 3.4.

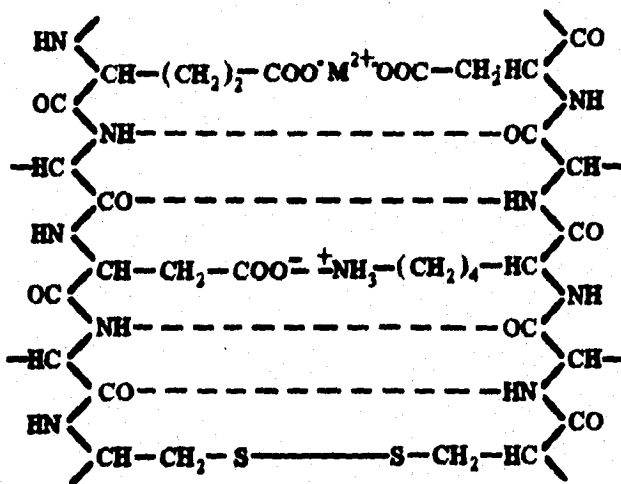


Figura 3.4.
Enlaces formados dentro del gel de gretina ⁽²²⁾

Con la presencia de anilina en los geles gris y negro, se supone le confiere a la red tridimensional una mayor estabilidad, ya que se considera que las aminas aromáticas (como la anilina) tienen una mayor fuerza básica que la amina secundaria terminal de la molécula de gretina, por lo que la desplazarán de su enlace con el grupo carboxilo, siendo este último enlace (anilina - carboxilo) más difícil de romper debido a que hay una mayor estabilidad con la amina aromática, porque esta última posee estructuras resonantes con lo que es capaz de soportar una deficiencia electrónica. ^(30,35) Considerando esta suposición se entiende el porque de la variación de los tiempos de calentamiento. La estructura se muestra en la figura 3.5.

Posiblemente también esté presente el fenómeno de solvatación, en la cual las moléculas de anilina formen una esfera que rodee a la molécula de gretina, en donde para

poder romper la red tridimensional, se deberá de eliminar primero la esfera de solvatación formada por la anilina, necesitándose una energía adicional

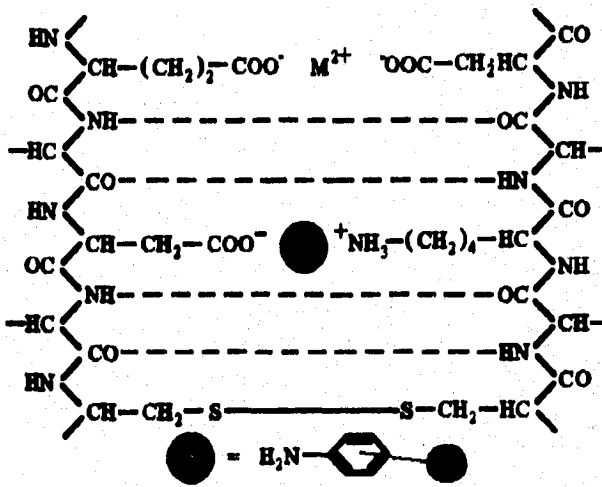


Figura 3.5.

Posibles enlaces entre la gredatina y la anilina

3.4. Punto térmico del gel.

Como se observa en la figura 3.6. las temperaturas en orden decreciente son $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$. Con esto se deduce que el punto térmico puede encontrarse entre el termopar 2 y 5, por lo que se optó en mover el termopar 5 en el otro extremo para determinar si en esa zona se presentan valores menores de temperaturas. Los datos se muestran en la figura 3.7.

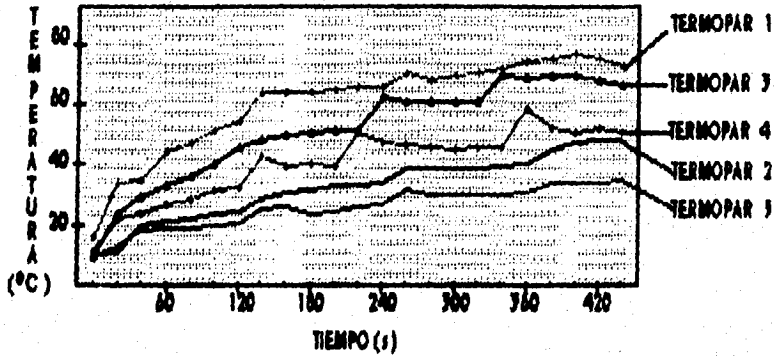


Figura 3.6.
Posición 1 para la localización del punto térmico del gel.

La figura 3.7. muestra que los valores de temperatura en orden decreciente son $T_1 > T_3 > T_4 > T_2 > T_5$. Como se observa en la gráfica, no se define muy bien donde se encuentra el punto térmico, sin embargo en este caso se encontró que el termopar 2 presentó los valores más bajos, por lo que se deduce que el punto térmico se encuentra entre los dos extremos de la placa y para poder comprobar esto se propuso otra posición colocando el termopar 5 en el centro.

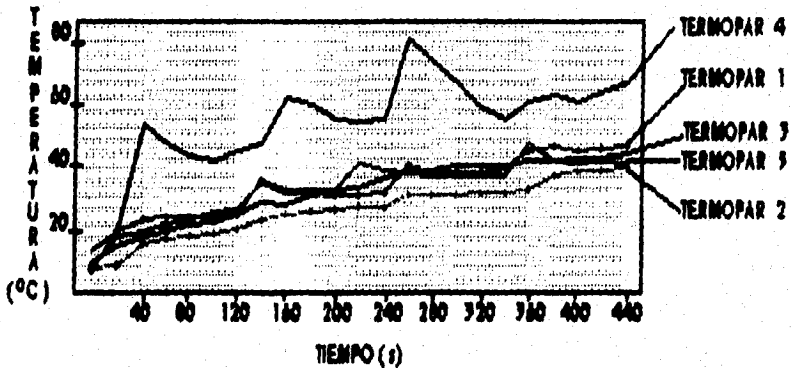


Figura 3.7.
Posición 2 para la localización del punto térmico del gel.

En la gráfica 3.8, los valores de temperatura más bajos se encuentran en el termopar 5, mientras que los valores más altos son del termopar 1.

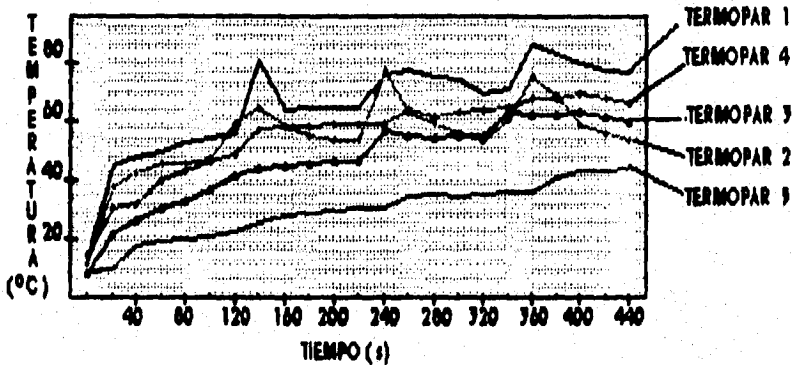


Figura 3.8.
Posición 3 para la localización del punto térmico del gel.

Como se observa en las gráficas de las figuras 3.6., 3.7. y 3.8. es difícil definir en donde se encuentra exactamente el punto térmico porque los valores de temperaturas de los otros termopares varía entre una posición y otra sin que haya alguna lógica, ya que no se movieron, pero esto es debido a que las ondas penetran en el producto de forma aleatoria, ocasionando variaciones de temperatura en los nodos entre una corrida y otra, aún en las mismas condiciones.

Aún con los problemas que presenta esto se determinó que en la posición 3 se encontraba el punto térmico, ya que la gráfica muestra claramente que el termopar 5 presenta valores más bajos con respecto a los otros termopares. Por lo anterior el punto térmico se localiza en el centro, el cual fue el punto de colocación para los otros 4 termopares, según el esquema de diferencias finitas explícito hacia el centro. (ANEXO A)

En las figuras 3.6., 3.7. y 3.8. se observan incrementos muy elevados de temperatura, seguido de una disminución en la misma, lo cual parece contradictorio, ya que se trata de un proceso de calentamiento, pero como se había mencionado el magnetrón del horno funciona mediante un ciclo de encendido y apagado, que ocasiona un gran incremento de temperatura cuando se activa, debido a que las microondas inciden en ese momento en una zona

determinada del producto y al desactivarse, el calor transformado por la energía de microondas se transfiere por contacto molecular (conducción) hacia otra zona, como consecuencia de esto la temperatura disminuye por varios intervalos de tiempo; esto se debe a que la naturaleza aleatoria de las microondas haga que la probabilidad de que incidan en una misma zona sea mínima, por lo que es poco probable que se mantenga una temperatura alta en esta zona.

Para determinar con que frecuencia ocurren los cambios bruscos de temperatura los datos obtenidos de uno de los termopares se pasaron al espacio de frecuencias mediante la TRANSFORMADA DE FOURIER, los cuales se muestran en la figura 3.9.

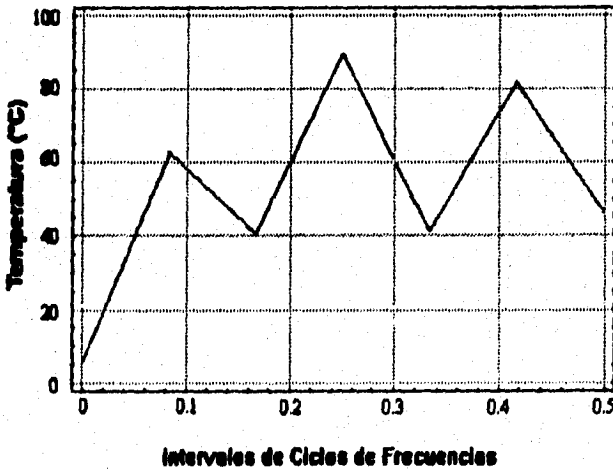


Figura 3.9.

Temperatura contra frecuencias de Fourier.

De la gráfica se obtuvieron los valores del primero, segundo y tercer pico, que fueron 0.084, 0.25 y 0.416 respectivamente. Se observa una periodicidad de 0.166 entre cada pico, lo cual nos indica que las microondas inciden en un mismo nodo a intervalos de tiempo constantes.

3.5. Valores de α y C_0 del gel.

3.5.1. Historias térmicas.

La figura 3.10. muestra los datos de temperatura con el tiempo del gel sin color.

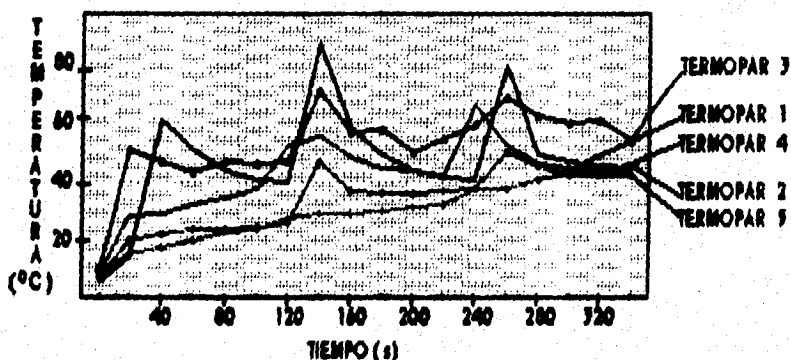


Figura 3.10.
Historias térmicas del gel sin Color.

En la gráfica se observa claramente que en los termopares 1 al 4 ocurren cambios drásticos de temperatura, lo cual se atribuye a que al incidir las microondas directamente en el gel los enlaces formados en éste se rompan más rápido, captando mayor cantidad de energía en unas zonas, ocasionando con esto un aumento súbito de temperatura, lo cual provoca un calentamiento no uniforme dentro del producto; como se puede ver en la gráfica, en el termopar 5 se alcanzan temperaturas de aproximadamente 45°C , y en el termopar 4 se obtienen valores de 85°C , lo que marca un diferencial de temperaturas de 40°C .

Los datos de temperaturas contra tiempo de los gels gris y negro se muestran en las gráficas 3.11. y 3.12.

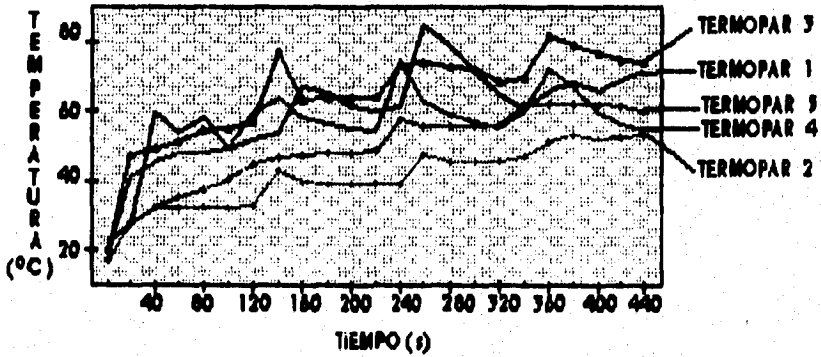


Figura 3.11.
Historias térmicas del gel Gris

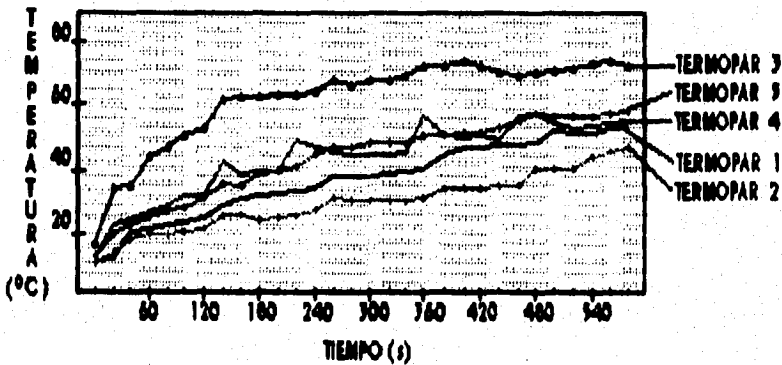


Figura 3.12.
Historias térmicas del Gel Negro

En la gráfica correspondiente al gel gris se observa que los cambios de temperatura son menos drásticos en comparación a los del gel sin color, mientras que en el gel negro el ascenso de las temperaturas es más uniforme. Este cambio es por la presencia de la anilina que origina el fenómeno de solvatación, generando una esfera que envuelve a la grenetina, la cual acumula calor dentro de esta de tal forma que parte de esta energía elimina la esfera de solvatación y la otra parte para romper la estructura del gel. Este proceso lleva a que la distribución de energía fuera más uniforme, lo cual se nota en las diferenciales de temperatura

obtenidas en los termopares de los geles gris y negro, en el primero se obtuvo un valor aproximado de 30°C y en el segundo de 25°C. La diferencia de estos valores del gel gris y negro es porque en el segundo la cantidad de anilina presente es mayor.

En la tabla B8 y la gráfica 3B (ANEXO B) se muestran los resultados estadísticos obtenidos donde el color es altamente significativo con el comportamiento térmico, por lo que en la gráfica de medias se observa que el color 3, correspondiente al gel negro es el que marca la variación con respecto a los otros 2.

3.5.2. C_p y ρ .

Los datos de C_p y ρ del gel se muestran en la tabla 3.6.

TABLA 3.6.
Valores de densidad y C_p del gel

C_p (kJ/kg°C)	ρ (kg/m ³)
3.768	1030

En los datos de la tabla 3.6. se observa que los valores obtenidos de C_p y ρ son muy cercanos a los de agua, lo cual es lógico porque en la estructura del gel el 90% es agua.

3.5.3. α y Q_0 .

Los valores de α y Q_0 se muestran en la tabla 3.7.

TABLA 3.7.
Valores de difusividad térmica y Q_0

Color	α (m ² /s)	Q_0 (W/m ³)
Sin color	1.031×10^{-5}	122.84
Gris	1.201×10^{-5}	210.53
Negro	9.980×10^{-5}	440.00

Las figuras 3.13. y 3.14 muestran la relación de α y Q_0 con el color.



Figura 3.13.

Relación de la difusividad térmica con el color del gel.

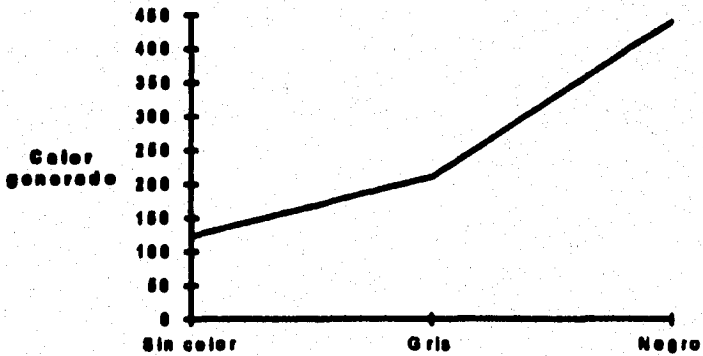


Figura 3.14.

Relación del calor generado con el color del gel.

En la gráfica de la figura 3.13. se observa que la difusividad térmica no lleva una relación cuantitativa con respecto a los cambios de color ocurridos en el gel, lo que puede deberse a la estructura formada con la grenetina y la anilina ya que α es una propiedad del material, sin embargo la variación de α que existe entre el gel sin color y el gel negro es del 3% que representa muy poca diferencia entre ambos valores. Por otro lado con los datos de ρ , C_p y

α de los geles sin color, gris y negro, se calculó la conductividad térmica (K) dando valores de 40, 47 y 39 W/m °C , respectivamente, lo cual no es lógico porque son valores que no corresponden a productos con alto contenido de humedad. Estas discrepancias pueden ser porque la obtención de datos mediante microondas para evaluar α no sea conveniente, por lo que se tendría que emplear un método convencional de calentamiento para su evaluación, el cual no se empleó en este proyecto. Otro razón es que α depende en gran medida de la temperatura.

En la figura 3.14, se observa que el calor generado aumenta con el cambio de color, lo cual nos demuestra que la esfera de solvatación formada entre la gredina y la anilina absorbe energía de microondas que es transformada en energía calorífica, distribuyéndola dentro del producto y como consecuencia dando una mayor uniformidad de calentamiento.

Con los resultados del calor generado de los geles se tiene que una mayor absorción de calor en el producto da como consecuencia mayor uniformidad de calentamiento, por lo que los resultados del gel negro representan el modelo de ayuda para poder seleccionar los materiales de película adecuados para empaquetar los bisquets y hornearlos en microondas.

3.6. Formulación del Bisquet.

La formulación que se empleó durante todas las pruebas de horneado se muestra en la tabla 3.8.

TABLA 3.8.
Formulación del bisquet

INGREDIENTES	CANTIDADES (g)
Harina	250
Margarina	150
Azúcar	30
Sal	5
Royal	10
Leche	40 ml
Huevo	1 pieza

La formulación obtenida con respecto a la que se tenía inicialmente no mostró gran variación ya que tanto en la margarina como en el royal se aumentó y disminuyó el 20 %, respectivamente.

El aumento de la mantequilla proporcionó al producto horneado una estructura más rígida, en cuanto al royal debido a que el proceso de horneado por microondas se lleva a cabo muy rápido, con una alta cantidad de este ingrediente en el producto se esponja demasiado y le proporciona un sabor amargo, por lo que al bajar la cantidad se obtuvo un producto menos poroso.

3.7. Localización del punto térmico de los bisqueta empacados.

Los datos de temperatura con respecto al tiempo en la posición 1 se muestran en la figura 3.15.

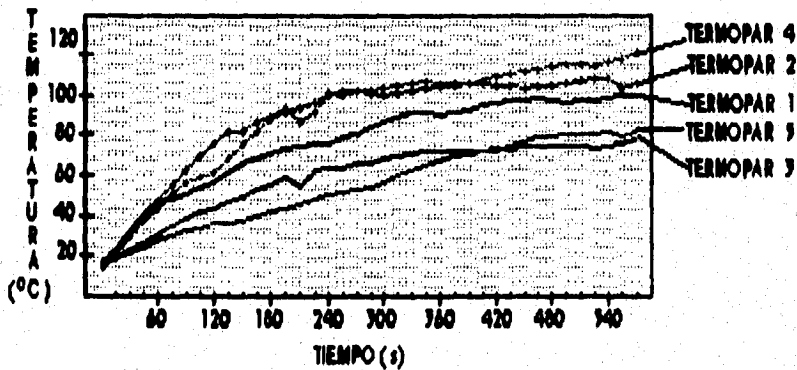


Figura 3.15.

Posición 1 para la localización del punto térmico del bisquet.

Los valores de temperatura en forma decreciente son $T_4 > T_2 > T_1 > T_5 > T_3$. Los valores muestran que el punto frío se localiza entre el termopar 5 y 3, pero como el termopar 4 mostró valores de temperaturas más altos con respecto a los obtenidos en el gel (en ese nodo fue el termopar 2), se supuso que el punto térmico se iba a localizar cerca del termopar 5.

La figura 3.16. representa los datos obtenidos en la posición 2.

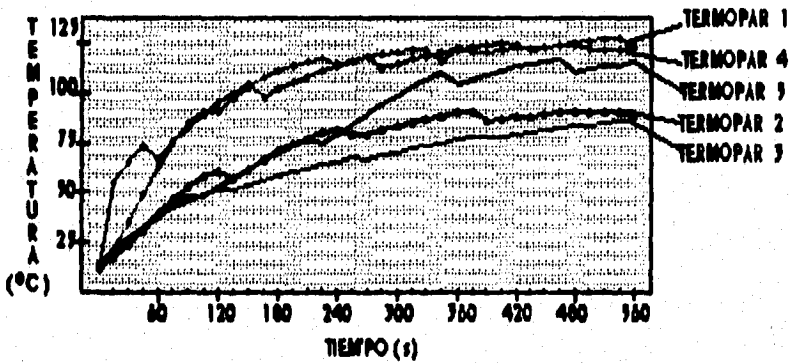


Figura 3.16.

Posición 3 para la localización del punto térmico del bisquet.

El orden de temperaturas de los termopares es $T_1 > T_4 > T_5 > T_2 > T_3$, con esto se observa que el punto térmico se localiza en la parte derecha de la placa, por lo que la tercera posición se propuso desplazando los termopares 1, 2, 4 y 5 3.00 cm a la derecha dejando en el centro de estos el termopar 3. Los datos de la posición 3 se muestran en la figura 3.17.

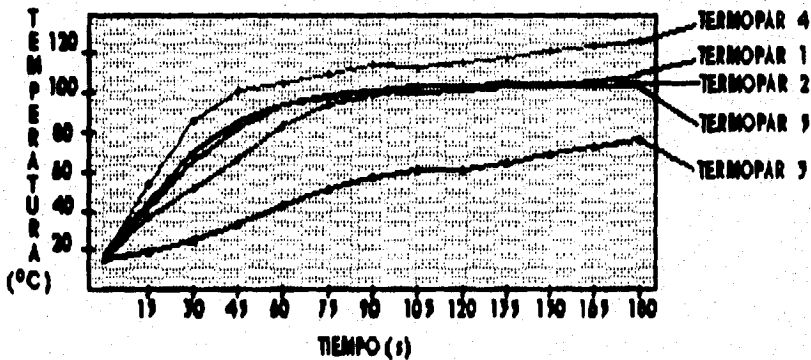


Figura 3.17.

Posición 3 para la localización del punto térmico del bisquet.

En la figura 3.17. se observa que el termopar 3 presenta los valores de temperatura más bajos, por lo que este punto que no corresponde al centro del alimento se va a tomar como el punto térmico y el cual sirve de referencia para la colocación de los otros termopares, según el método de diferencias finitas hacia el centro. (ANEXO B)

Analizando la localización del punto térmico del gel con el del bisquet, según los resultados, en el primero el punto térmico se encontró en el centro mientras que en el segundo más cerca de la orilla, lo que se atribuye a que son dos productos con composiciones químicas muy diferentes, pero la finalidad del proyecto no es analizar la similitud en la localización del punto térmico, sino la relación en el comportamiento térmico de la variación del color en el gel frente a la variación de las películas de los empaques del bisquet.

En las gráficas de las figuras 3.15., 3.16. y 3.17. no se observan cambios drásticos de temperatura en comparación con los geles, lo cual se debe a varias razones, una es la composición química, otra es los cambios químicos que ocurren en los productos y por último los valores iniciales de temperatura que se tenían en cada producto porque el gel presentaba valores de 5°C a 7 °C y la masa de bisquet de 20°C a 22°C, lo cual ocasionaba que en el primero bajará más rápido la temperatura cuando las zonas calientes se ponían en contacto con las zonas frías.

3.8. Tiempo de cocción del bisquet.

En la tabla 3.9. se muestran los tiempos de cocción obtenidos para el bisquet a las potencias 1 y 3.

TABLA 3.9.
Tiempos de cocción del bisquet

EMPAQUE	POTENCIA 1	POTENCIA 3
	Tiempo (min)	Tiempo (min)
1	9.00	2.75
2	9.50	3.00
3	11.25	3.50
4	13.00	4.25

- 1) Sin empaque
- 2) Empaque de LDPE
- 3) Empaque de LDPE/EN
- 4) Empaque de LDPE/Aluminio/EN

Los datos de la tabla 3.9. muestran que al variar el empaque el tiempo de cocción aumenta para las dos potencias.

Las figuras 3.18. y 3.19 representan la relación de los empaques con el tiempo de proceso.

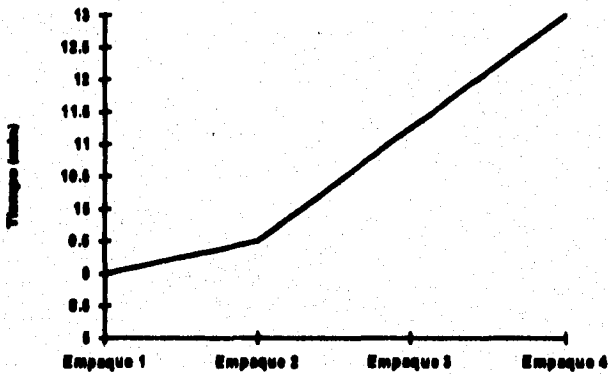


Figura 3.18.

Relación de los empaques con el tiempo de proceso a potencia de 72 W.

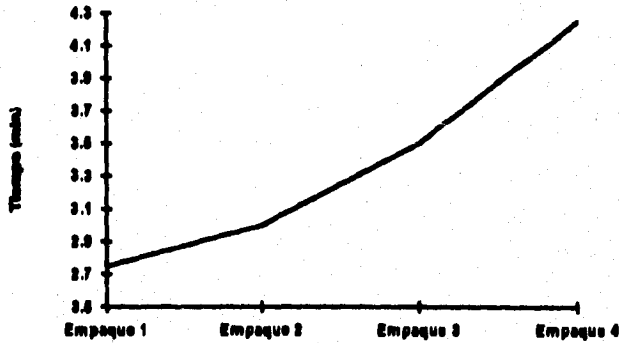


Figura 3.19.

Relación de los empaques con el tiempo de proceso a potencia de 210 W.

En las figuras 3.18. y 3.19 se observa un incremento casi lineal entre el empaque 2, 3 y 4, debido a la naturaleza de los materiales utilizados entre los cuales se supone afectan al proceso de calentamiento (alargando el tiempo de proceso), ya que absorben parte de la energía de microondas, pudiéndose observar que en el empaque 4 la presencia del papel aluminio incrementa en mayor proporción el tiempo de proceso, seguido del empaque 3 el cual contiene papel encerado, y con respecto al empaque 2 no existe un incremento muy notorio con relación al empaque 1 porque el LDPE es un material que es casi totalmente transparente a las microondas, propiedad que no es observada en los empaques 3 y 4.

En consecuencia se puede inferir que la presencia de un agente envolvente afecta el tiempo de proceso de un producto al almacenar energía proveniente de las microondas.

3.9. Valores de α y Q_0 del Bisquet.

3.9.1. Historias Térmicas.

Las figura 3.20.y 3.21. representan los datos de temperatura con respecto al tiempo del bisquet sin empaque a potencia 1 y 3, respectivamente.

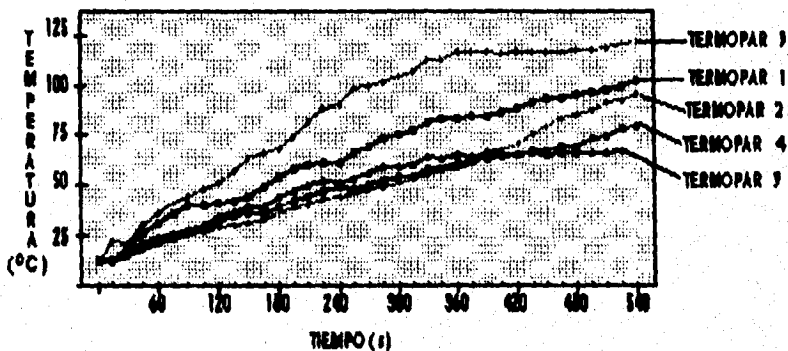


Figura 3.20.
Historias térmicas del bisquet empaque 1 potencia 1.

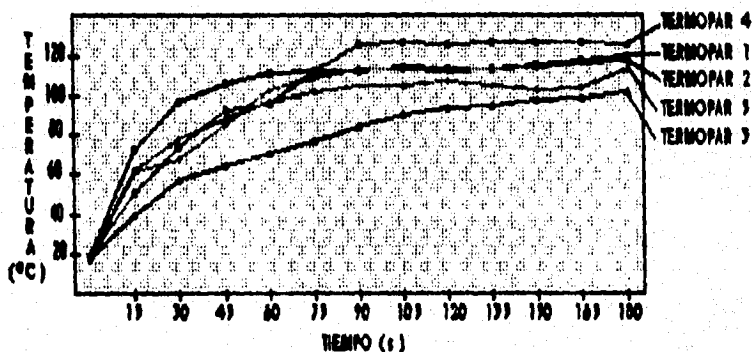


Figura 3.21.
Historias térmicas del bisquet empaque 1 potencia 3.

En las figuras 3.20. y 3.21. se observa claramente que al aumentar la potencia del horno además de disminuir el tiempo, la uniformidad de calentamiento es mejor, ya que para la potencia 1 se tiene un diferencial de temperaturas de aproximadamente 55°C , mientras que en la potencia 3 de 25°C , esto se atribuye a un mayor tiempo de exposición del producto con las microondas, lo cual reduce la transmisión de calor por conducción y genera muchos puntos con calentamiento simultáneo. Sin embargo en las 2 figuras se observa que hay incrementos seguidos de una disminución de la temperatura lo cual no es conveniente para el producto.

En la figura 3.20. se observa que el termopar 2 en los primeros intervalos de tiempo alcanzan temperaturas bajas y súbitamente empieza a subir la temperatura, alcanzando valores de temperaturas cercanos a los obtenidos en el termopar 1, que es uno de los más altos. Esto origina un calentamiento no uniforme.

Las figuras 3.22. y 3.23. muestran los datos de temperatura contra tiempo del empaque 2 a potencia 1 y 3.

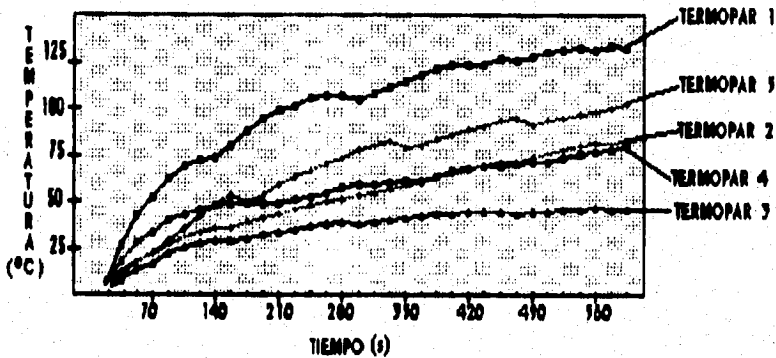


Figura 3.22.

Historias térmicas del bisquet empaque 2 potencia 1.

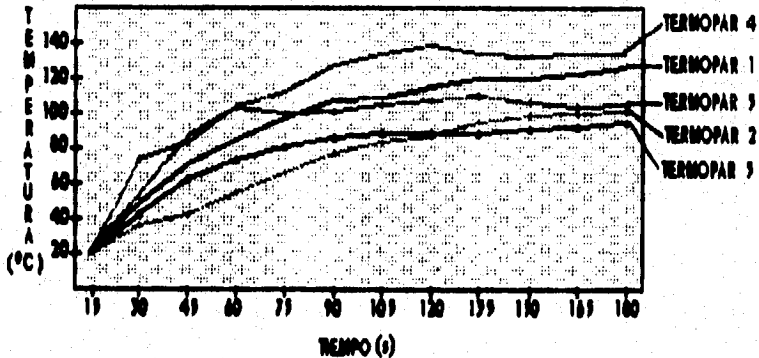


Figura 3.23.

Historias térmicas del bisquet empaque 2 potencia 3.

Las figura 3.22. al igual que la figura 3.20. presenta un calentamiento no uniforme con un diferencial de temperatura de 60°C aproximadamente, mientras que la figura 3.23. de 30°C , mostrando con este valor un calentamiento más uniforme.

Las gráficas de las figuras 3.20 con la 3.22 y 3.21 con 3.23 muestran similitud en su comportamientos térmicos, ya que como se puede observar hay aumentos de temperaturas seguidos de una disminución en la misma, por lo que comparando esto con los tiempos obtenidos se deduce que la película de LDPE del empaque 2 afecta en menor grado el calentamiento del producto, ya que lo que se pretende es tener una mayor uniformidad dentro del mismo y este material no lo proporciona.

Los datos de temperatura contra tiempo del empaque 3 para la potencia 1 y 3 se muestran en las figuras 3.24. y 3.25.

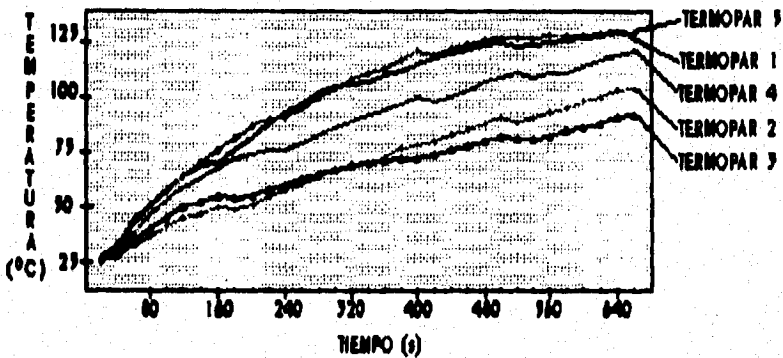


Figura 3.24.

Historias térmicas del bisquet empaque 3 potencia 1.

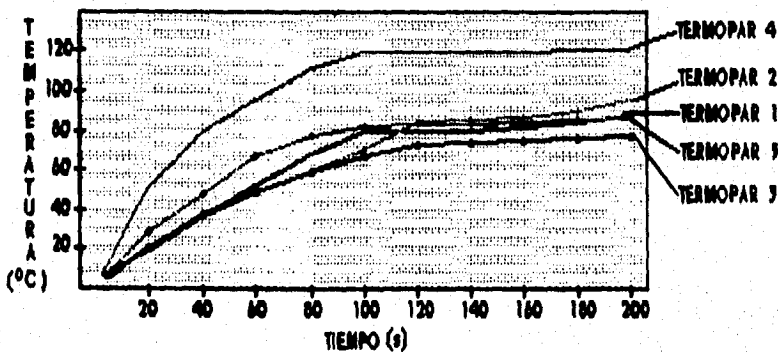


Figura 3.25.
Historias térmicas del bisquet empaque 3 potencia 5.

En la gráfica de la figura 3.24 se observa una mayor uniformidad de calentamiento con respecto a las gráficas de las figuras 3.20. y 3.22. siendo así que el diferencial de temperatura es de 35°C aproximadamente y aunque se observan aumentos de temperatura seguidos de una disminución, el comportamiento térmico que presentan los 5 termopares tienden a igualarse.

Con respecto a la gráfica de la figura 3.25. los aumentos y decrementos de temperatura ya no se notan y aunque el diferencial de temperaturas es casi igual que los obtenidos en las figuras 3.21. y 3.23., debido a que el termopar 4 mostró valores de temperaturas más altos, el comportamiento de la curva para los 5 puntos muestra un calentamiento más uniforme con respecto a estas 2 últimas figuras.

Las figuras 3.26. y 3.27. representan los datos de temperatura contra tiempo del empaque 4 a la potencia 1 y 3.

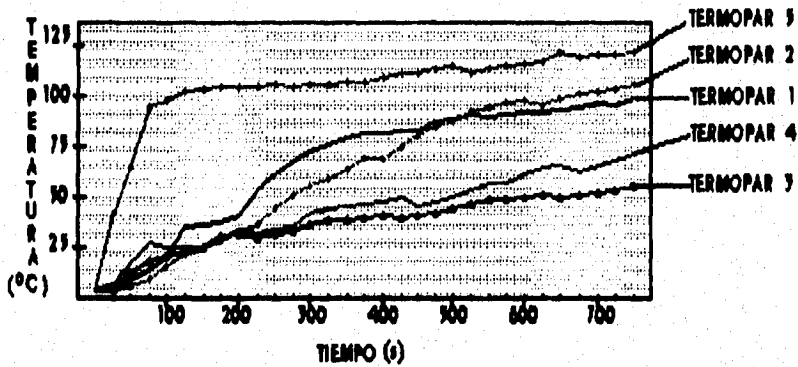


Figura 3.26.
Historias térmicas del bisquet empaque 4 potencia 1.

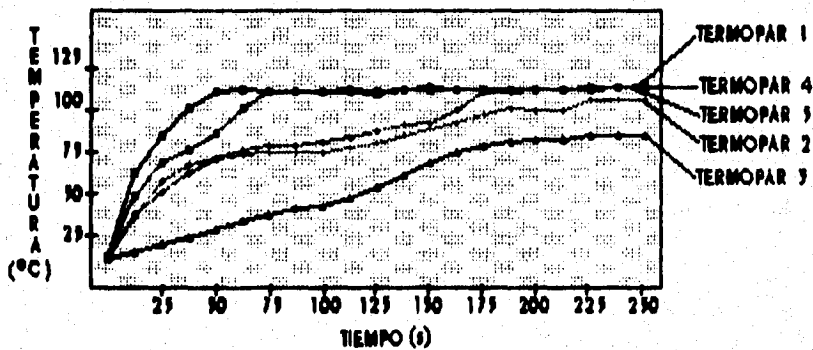


Figura 3.27.
Historias térmicas del bisquet empaque 4 potencia 3.

Las gráficas de las figuras 3.26. y 3.27. muestran un comportamiento térmico muy diferente en comparación a las anteriores gráficas dando como consecuencia un calentamiento no uniforme porque ninguna de las curvas de los termopares (excepto el 3) muestra una tendencia clara, tal es el caso de la figura 3.26. que aparte de los aumentos y decrementos de temperatura que se muestran en algunos puntos no hay marcada una periodicidad en estos cambios a diferencia de las figuras 3.20., 3.22. y 3.24.

Con respecto a la gráfica 3.27. fue difícil realizar las mediciones ya que al aumentar la potencia se concentraba demasiada energía en el aluminio que llegaba un momento en que empezaban a salir chispas, por lo que se tenía que suspender las mediciones y volver a empezar, pudiéndose lograr sólo 1 medición, con lo que la medición presentada no es muy representativa, pero de cualquier forma el resultado fue el mismo que para la potencia 1, con la presencia del papel aluminio se concentra demasiada energía, sólo que debido a su propiedad de reflejar las ondas ocasiona que estas se distribuyan dentro del producto en forma aleatoria, lo cual provoca que se alcanzan temperaturas más altas en unos puntos con respecto a otros.

Los resultados estadísticos para determinar la influencia del comportamiento térmico con la variación del empaque a las potencias de 72 W y 216 W se muestran en las tablas 9B y 10B y en las gráficas 4B y 5B del ANEXO B. Con los valores de las tablas se obtiene que el empaque es altamente significativo para las 2 potencias. En la gráfica 4B se observa que en el empaque 4 se obtienen valores de temperatura diferentes en comparación con los otros 3 empaques, sin embargo en la gráfica 5B no se nota muy claro la diferencia.

En la tabla 11B del ANEXO B se indica la influencia de la interacción del empaque con la potencia, mostrando que es poco significativo ($\alpha = 0.0287$), lo cual indica que el empaque y la potencia influyen en los valores obtenidos de temperatura pero en forma independiente.

Dados los resultados se descarta la posibilidad de emplear el papel aluminio para empacar el bisquet y hornearlo por lo que el análisis de calor generado y difusividad térmica no se realizó para este empaque.

Tomando como referencia el análisis que se realizó con las gráficas 3.10., 3.11. y 3.12. se puede deducir que la película de papel encerado empleada en el empaque 3 muestra un comportamiento análogo al obtenido en el gel negro, por lo que la presencia de una barrera mejora la distribución de energía, al evitar que esta concorra en un sólo punto.

3.2.2. Cp y ρ .

La tabla 3.10 muestra la composición química de la masa y del bisquet, así como la media aritmética con la que se cálculo Cp.

TABLA 3.10.
Composición química de la masa y bisquet

COMPOSICION	MASA	BISQUET	PROMEDIO
Humedad	22.24	18.96	20.6
Proteínas	8.05	8.39	8.22
Grasa	25.13	26.19	25.66
CHOS	40.15	41.86	41.00
Otros	4.43	4.60	4.60

En la tabla 3.10. se observa que no hay mucha diferencia entre los valores de masa y el bisquet ya que en las pruebas que se hicieron para determinar estos valores se procuró que la pérdida de humedad fuera mínima.

Los valores de ρ y C_p se muestran en la tabla 3.11.

TABLA 3.11.
Valores de densidad y C_p de la masa y Bisquet

	C_p (kJ/kg °C)	ρ (kg/m ³)
Masa	2.118	1597.94
Bisquet	2.031	730.77
Promedio	2.107	1164.36

Como se observa en la tabla 3.11. la densidad disminuye casi la mitad, lo que se atribuye al aumento de volumen que se obtuvo en el producto final.

3.9.3. α y Q_0 .

Los datos de α y Q_0 se muestran en la tabla 3.12.

TABLA 5.18.
Valores de difusividad térmica y Q_0 del Bisquet

EMPAQUE	β (m^2/s)		Q_0 (W/m^2)	
	POTENCIA 1	POTENCIA 3	POTENCIA 1	POTENCIA 3
1	2.160×10^{-6}	2.755×10^{-5}	172.66	3152.05
2	2.570×10^{-6}	2.475×10^{-5}	148.23	2946.46
3	2.393×10^{-6}	2.973×10^{-5}	273.21	5410.81

Las gráficas 3.28 y 3.29 representan la relación de la variación de los empaques con α a las potencias 1 y 3.

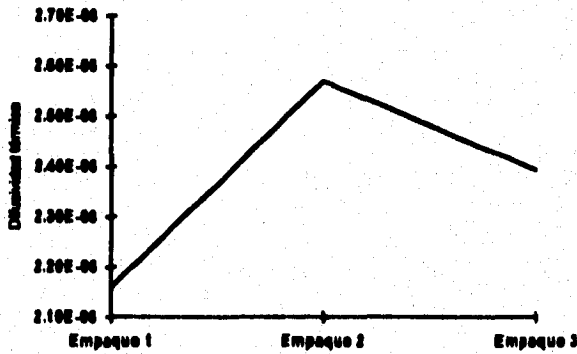


Figura 5.20.

Relación de los empaques con la difusividad térmica a potencia de 72 W.

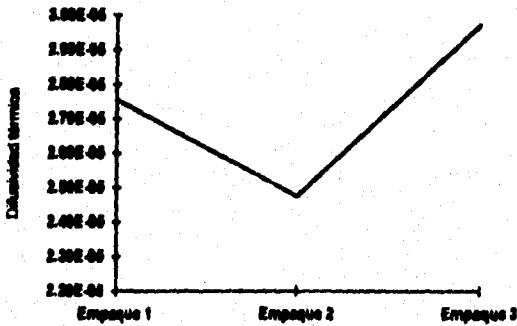


Figura 3.29.

Relación de los empaques con la difusividad térmica a potencia de 216 W.

Como se muestra en las figuras 3.28 y 3.29 el valor de α varía en gran medida ya que no es posible que al variar la potencia varíe su valor si se trata del mismo producto. Calculando la conductividad térmica para el dato mínimo de α se tienen valores de 5.30 y 60.733 a la potencia 1 y 3 respectivamente, que al compararla con el valor de conductividad térmica de pasta para pizza (fue lo más parecido que se encontró al bisquet) que es de $0.45 \text{ W/m}^{\circ\text{C}}$ (4), se deduce que α se tendría que evaluar fuera del horno de microondas mediante un método convencional para poder conocer su valor real

Analizando los datos de α de las placas de gel a la potencia 1 con los de los bisquets empacados se observa que tuvieron el mismo efecto cuantitativo en cuanto a la variación entre cada lote, ya que no excedió del 17%, pero no se puede llegar a relacionarlos porque en primeras son diferentes materiales y en segunda los valores obtenidos en ambos casos no corresponden a los reales.

Las gráficas de las figuras 3.30. y 3.31. representan la relación entre la variación de los empaques con el calor generado a las potencias 1 y 3.

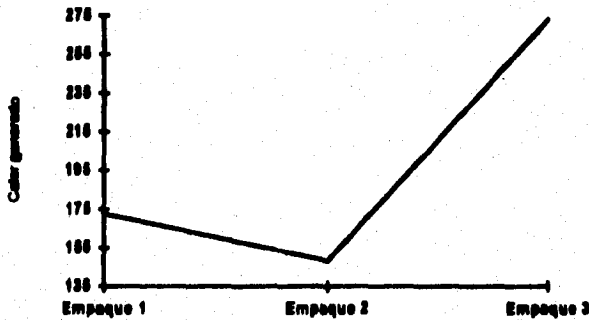


Figura 3.30.

Relación de los empaques con el calor generado a potencia de 72 W.



Figura 3.31.

Relación de los empaques con el calor generado a potencia de 210 W.

Las gráficas de las figuras 3.30 y 3.31. muestran claramente un aumento de 46 % del calor generado para las 2 potencias., sin embargo entre los empaques 1 y 2 la diferencia es de 13% y 7% a la potencia 1 y 3 respectivamente. Con estos resultados se reafirma el hecho de que el emplear material transparente como una única película para empacar bisquets no es adecuado, porque no proporciona ni reducción en los tiempos de calentamiento ni mayor uniformidad, sin embargo el adicionar una película opaca como lo es el papel encerado, aunque el tiempo se incrementa, se obtiene una mayor uniformidad de calentamiento. Por otro lado hasta cierto punto es benéfico para el proceso de horneado un tiempo razonablemente más

largo, ya que si las reacciones de leudado se llevan a cabo rápidamente pueden llegar a romper la estructura que se va formando, pero tampoco es conveniente un tiempo muy largo porque puede apelmazarse la pasta.

Con los resultados obtenidos en el bisquet se tiene que la presencia de un material opaco (papel encerado) proporciona una mayor uniformidad de calentamiento al producto, notándose en un valor mayor de calor generado, tal como se mostró en los resultados de los geles.

3.10. Propiedades dieléctricas y de transmisión.

Los resultados de K' , K'' , $\tan \delta$, D_p y α' se muestran en la tabla 3.13.

TABLA 3.13.
Valores de propiedades dieléctricas y de transmisión

TEMPERATURA (°C)	K'	$\tan \delta$	K''	D_p (m)	α' (1/m)
55	33.0	2.20	72.6	0.0040	248.99
70	7.6	1.08	8.20	0.0140	68.96
90	4.3	0.96	4.13	0.0213	46.93
120	3.2	0.78	2.50	0.0296	33.74

La gráfica 3.32. muestra los datos de K' con respecto a la temperatura..

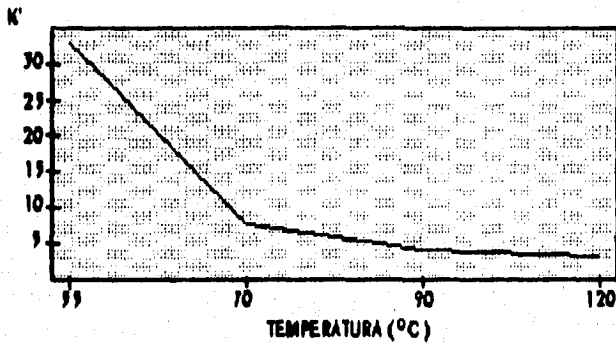


Figura 3.32
Constante dieléctrica con respecto a la temperatura.

Como se observa en la gráfica 3.32, hay un decremento drástico de K' entre las temperaturas de 55°C a 70°C , debido a que en este rango ocurre la gelatinización del almidón, ocasionando grandes cambios dentro del producto. También se debe tener en cuenta que K' disminuye cuando la densidad baja y debido a que durante el proceso de horneado el volumen del producto aumenta la densidad se ve afectada. Sin embargo después de 70°C el valor de K' tiende a estabilizarse.

La gráfica 3.33, representa D_p con respecto a la temperatura.

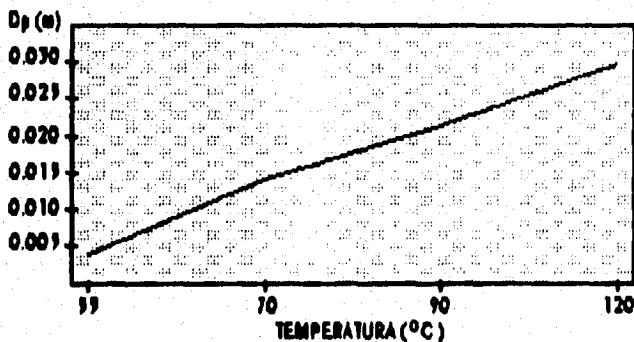


Figura 3.33.
Profundidad de Penetración con respecto a la temperatura.

La gráfica 3.33, indica que al incrementarse la temperatura D_p aumenta, lo que es razonable porque conforme transcurre el tiempo de proceso la temperatura se va incrementando, debido a que la onda esta penetrando en el alimento.

La ecuación 3.1. relaciona la D_p con la temperatura:

$$D_p = \log T(0.0744858) - 0.124650$$

3.1.

Lo forma en que se evaluó K' y $\tan \delta$ no fue la más adecuada porque sus valores pueden variar con la frecuencia, la cual no se consideró; sin embargo nos da una aproximación a valores reales, ya que los datos obtenidos de D_p no muestran valores ilógicos. Lo más conveniente es realizar las mediciones dentro del mismo campo electromagnético que se crea entre el alimento y las microondas, pero como no se contó con el equipo ni con la información real para poder realizar las mediciones se trató de adaptar un método que por lo menos nos indicará el comportamiento con la temperatura.

Para poder determinar realmente el comportamiento de las propiedades dieléctricas recientemente se encontró un artículo⁽²⁵⁾ en donde mencionan en forma general un sistema llamado Hewlett Packard el cual mide y cuantifica la energía que es almacenada en el alimento (K') y la cantidad de energía disipada (K''). Consiste de un tubo herméticamente sellado para altas temperaturas, un analizador en red, cables y una computadora. Las mediciones se realizan sumergiendo el tubo en líquidos o semisólidos o presionándolo con materiales sólidos; posteriormente el analizador transmite una señal de microondas a través del tubo y dentro del alimento, la cual es registrada en la computadora. Con este sistema se puede conocer como cambian las propiedades dieléctricas con la temperatura y la frecuencia de microondas.

3.1.1. Optimización de las condiciones de proceso.

Los datos que se introdujeron en el programa fueron:

T_{inicial} del alimento- 22°C
 T_{horno}- 20°C
 Coeficiente convectivo- 2 W/m²°C
 T_{final} del alimento- 120°C
 Profundidad de penetración = 0.004 m
 Potencia incidente- 26666 y 80000 W/m²
 Número de Fo- 0.25
 Número de nodos (en x)- 5
 Largo del alimento- 0.20 m
 Ancho del alimento- 0.135 m
 Densidad- 1164 kg/m³
 Calor específico- 2107 J/s kg °C
 Valor de la pendiente para Dp- 0.0745
 Valor de la ordenada para Dp- -0.125

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.14.

TABLA 3.14.
Valores de la optimización de las condiciones de proceso

	Potencia incidente 26666 W/m ²	Potencia incidente 80000 W/m ²
Potencia horno (W)	105	215
Dimensiones (cm)	24 x 16	19 x 13
ΔT (°C)	10	10.5
Tiempo (min)	7.83	2.67

En la tabla 3.14. se observa que a la potencia incidente de 26666 se pueden emplear charolas más grandes, pero el tiempo de proceso es aproximadamente 3 veces mayor que el correspondiente a la potencia incidente de 80000, aunque para esta última se necesitan charolas más pequeñas. Con respecto a la potencia del horno no es muy grande la de 80000 con respecto a la de 26666, por lo que el costo de energía se elevaría si el tiempo de proceso es mayor.

Dados los resultados obtenidos se recomienda emplear para envasar los bisquets charolas de 19 x 13 cm, empacadas con LLPE/PEN y hornearlas a una potencia de 215 W.

La desventaja de emplear charolas de menor dimensiones es que se necesitaría una mayor cantidad para obtener un determinado volumen de producción, pero si se realiza un análisis de costos el consumo de energía sería mayor si se emplean charolas de dimensiones más grandes, por lo que convendría más invertir en los envases.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se logró seleccionar un empaque adecuado para la cocción del bisquet, en base a la relación del calor transformado con la distribución del mismo dentro del producto.

La composición de los alimentos influye en el patrón de calentamiento, principalmente debido a la presencia de agua, observándose que el ciclo de encendido y apagado del horno de microondas influye poco o casi nada.

Se propone comprobar la estructura formada entre la grenetina y la anilina mediante espectrometría infrarroja ya que con este método se identificó la estructura del gel de grenetina.

Para el proceso de calentamiento de alimentos es preferible el uso de empaques para minimizar pérdidas de agua; además de dar al producto un mejor patrón de calentamiento.

Con el análisis comparativo del modelo se determinó que el uso de materiales de cobertura opacos ocasiona que la distribución de temperaturas dentro del producto sea más uniforme, obteniendo con ello un producto de mejor calidad.

El uso de empaques que contengan papel aluminio se puede emplear, siempre y cuando no se requiera un calentamiento uniforme del producto, ya que interfiere con la absorción de las microondas, además no se pueden manejar potencias muy altas porque la concentración de energía en el papel aluminio es muy grande lo que ocasiona "chispas" que pueden llegar a quemar el producto.

Es necesario buscar un diseño de empaque con aluminio que permita una mejor distribución de la energía en la superficie para poder lograr el dorado de los productos.

La difusividad térmica es necesario evaluarla fuera del horno de microondas por un método convencional, ya que de lo contrario se obtienen valores erróneos, además las microondas no influyen en el valor porque básicamente depende de la temperatura y de la composición del alimento.

La determinación de las propiedades dieléctricas no se pudo realizar con suficiente precisión debido a la falta de un instrumento de medición adecuado, pero puede ser que estas no dependan en gran medida de la frecuencia porque los datos obtenidos no muestran incongruencias.

Debido a que en el proceso de horneado mediante microondas no se obtiene el color adecuado y la formación de la costra, lo conveniente sería dividir el proceso en dos etapas; la primera es llevar a cabo la cocción del producto en microondas en charolas rectangulares empacadas con polietileno/papel encerado, dado que con estos materiales se obtiene una mejor distribución de temperatura y la segunda pasarlo al método convencional en el cual se obtendrá la apariencia requerida.

Con el programa de computo que se elaboró se obtuvieron resultados muy cercanos a los obtenidos experimentalmente, por lo que se puede emplear para calcular tiempos de proceso de calentamiento en otros productos alimenticios.

Es preferible emplear potencias incidentes bajas, ya que con valores muy grandes se obtienen diferenciales de temperatura muy altos.

El proceso por microondas, aunque muestra ventajas en la reducción del tiempo de proceso no muestra un comportamiento térmico similar en el mismo producto entre una repetición y otra bajo las mismas condiciones, lo que dificulta el análisis de los datos.

Las microondas no proporcionan al alimento un calentamiento completamente uniforme, ya que la naturaleza aleatoria de las microondas ocasionan que unas zonas se calienten más rápido que otras.

Es necesario determinar si en otro método de calentamiento se pueden obtener perfiles de temperatura más uniformes.

N O M E N C L A T U R A

- A - Area de flujo [-] m²
C - Capacitancia con el dieléctrico [-] F
C = Constante de velocidad de la luz en el vacío = 299, 792, 458 [-] m/s
C₁ = 3.22 x 10⁸ [-] kcal μ m⁴/m² h
C₂ = 1.439 x 10⁻⁴ [-] μ m K
C₀ - Capacitancia sin el dieléctrico [-] F
Cp - Calor específico [-] kcal / kg °C
Dp - Profundidad de penetración [-] m
E - La intensidad de campo eléctrico [-] V/m
E_{cm} - Poder emisivo monocromático del cuerpo negro [-] kcal/m²h μ m
f - Frecuencia [-] 1/s ó Hz
h - Coeficiente convectivo [-] kcal/m²°C h
k - Conductividad térmica [-] kcal/m °C h
P₀ - Potencia incidente [-] W/m²
P_x - Potencia absorbida [-] W/m²
Q - Flujo de calor [-] kcal
Q - Energía incidente [-] kcal/m³
Q_{abs} - Calor absorbido [-] W/m²
q₀ - Potencia por unidad de área inicial [-] W/m²
Q₀ - Calor generado [-] kcal/m³
q_x - Potencia por unidad de área a un espesor [-] W/m²
R - Resistencia [-] Ω
t - Tiempo [-] s
T - Temperatura [-] °C
T - Temperatura absoluta. [-] K
T_c - Temperatura corregida [-] °C
T_{sc} - Temperatura sin corregir [-] °C
x - Espesor [-] m
Z - Impedancia [-] Ω

ADIMENSIONALES

- A- Energía emitida por el cuerpo
- b- Ordenada al origen
- E- Potencia emisiva total.
- E_{η} - Potencia emisiva del cuerpo negro.
- Fo- Número de Fourier
- K- Constante dieléctrica
- K*- Constante dieléctrica relativa
- m- Pendiente
- q_1 - Radiación incidente en el cuerpo.
- tan- Tangente

LETRAS GRIEGAS

- α - Coeficiente de absorción [-] 1/m
- α - Difusividad térmica [-] m^2/h
- α' - Coeficiente de atenuación [-] 1/m
- α - Nivel de significancia
- δ - Angulo entre la corriente total y la corriente cargada [-] Rad.
- δ - Diferencial
- Δ - Intervalo
- ϵ' - Constante dieléctrica del material
- ϵ_0 - Constante dieléctrica del vacío 8.85×10^{-12}
- i - Intensidad de corriente en un tiempo "x" [-] A
- i_0 - Intensidad de corriente en el tiempo 0 [-] A
- λ - Longitud de onda [-] μm
- λ_{max} - Longitud de onda correspondiente al pico de la curva de radiación [-] μm
- ∇^2 - Laplaciano
- π - Constante de la relación entre el diámetro y la circunferencia - 3.14159
- ρ - Densidad [-] kg/m^3
- σ - Constante de Stefan-Boltzmann - 4.878×10^{-8} [-] $kcal/m^2h^{\circ}K$

BIBLIOGRAFIA

- 1) Aguayo, M. L. (1993). "Características de la transferencia de calor por radiación en hornos de microondas al esterilizar productos lácteos contenidos en empaques de diferente geometría", Tesis, Escuela Militar de Ingenieros, México, pp. 22-35, 41-45.
- 2) Anónimo. (1987). Ingredients and Packages for Microwable Foods. Food Technol. 40 (6), 100-104.
- 3) Anónimo. (1987). Microwable Foods-Industry's Response to Consumer Demands for Convenience. Food Technol. 41 (6), 52-62.
- 4) Ayappa, A. K., Davis, H. T., Davis, E. A. y Gordon, J. Analysis of Microwave Heating of Materials with Temperature-Dependent Properties. Chem. Eng. Prog. 32 (3), 313-322.
- 5) Badui, D. S. (1984). "Química de los Alimentos", Alhambra, México, pp. 60-68, 82-86.
- 6) Bracewell, R. N. (1986). "The Fourier Transform and its applications", McGraw-Hill, Singapore, pp. 6-17.
- 7) Chapra, S.C. "Métodos numéricos para ingenieros con aplicaciones a computadoras personales", McGraw-Hill, México, pp. 86-95, 282-287.
- 8) Charley, H. "Tecnología de Alimentos", Limusa, México, pp. 285-320.
- 9) Chemische Fabrik Budenheim y Nutriquim, S. A. C.V. (1992). "Agentes Leudantes: Tipos, Características Tecnológicas y Aplicaciones en Productos de Panadería", Chemische Fabrik Budenheim y Nutriquim, S.A. C.V., pp. 1-9.
- 10) Cooper, W. D. (1982). "Instrumentación electrónica y mediciones", Prentice/Hall Internacional, Colombia, pp.158-161.
- 11) Crompton & Knowles. (1993). Partnership yields new Maillard flavor systems for microwave foods. Food Eng. 65 (6), 36-37.
- 12) Daniels, F. (1970). "Experimental Physical Chemistry", McGraw Hill, New York, pp.230-235.
- 13) Datta, A. K. (1990). Heat and Mass Transfer in the Microwave Processing of Food. Chem. Eng. Prog. 86 (6), 47-53.
- 14) Datta A.K. and Hu, W. (1992). Optimization of quality in microwave heating. Food Technol. 46 (12), 53-56.
- 15) Decsreu, V. R. (1986). Microwave Food Processing Equipment Throughout the World. Food Technol. 40 (1), 99-105.

- 16) Decareu, V. R. y Peterson, R. A. (1986). "Microwave Processing and Engineering", Ellis Horwood, Great Britain, pp. 89-105.
- 17) Edgar, R. (1986). The Economics of Microwave Processing in the Food Industry. Food Technol. 40 (1), pp. 106-112.
- 18) Fellows, P. (1994) "Tecnología del procesado de los alimentos" ,Acribia, España, pp. 325-327.
- 19) Fish, L. D. (1992). Análisis por Microondas para el Proceso y Control de Calidad en la Industria Alimentaria. Industria Alimenticia. 14 (1), pp. 36-38.
- 20) Gerling, J. (1986). Microwaves in the Food Industry Promise and Reality. Food Technol. 40 (1), 82-83.
- 21) Giese, J. (1992). Advances in Microwave Food Processing. Food Technol. 46 (10), 118.
- 22) Glicksman, M. (1969). "Gum Technology in the Food Industry", Academic Press, INC., USA, pp. 554-568.
- 23) Gottfried, B. S.(1988). "Programación en Pascal (Serie Schaum)", McGraw-Hill, México, pp. 14-287.
- 24) Harflinger, L. (1992). Microwave Sterilization. Food Technol. 46 (12), 57-61.
- 25) Hewlett Packard, P.O. (1993). Dielectric measurement system aids optimization of microwave formulation. Food Eng. 65 (11), 26-32.
- 26) Holman, J. P. (1990). "Heat Transfer", McGraw Hill, New York, pp. 385-394.
- 27) Institute of Food Technologists. (1989). Microwave Food Processing. Food Technol. 43 (1), 117-126.
- 28) Instituto Mexicano del Plástico Industrial. (1989). "Manual para identificación de plásticos", Instituto Mexicano del Plástico Industrial, México, pp. 78-101.
- 29) Kern, D. Q. (1991). "Procesos de Transferencia de Calor", CECSA, México, pp. 13-85.
- 30) March, J. (1977). "Advanced Organic Chemistry: Reactions, Mechanisms and Structure"; McGraw-Hill, Japón, pp. 68.
- 31) Mudgett, R. E. (1982). Electrical Properties of Foods in Microwave Processing. Food Technol. 36 (2), 109-115.
- 32) Mudgett, R. E. (1986). Microwave Properties and Heating Characteristics of Foods. Food Technol. 40 (1), 84-93.
- 33) Mudgett, R. E. (1990). Microwave Sample Preparation. Wesley, USA, pp. 15-16.
- 34) O'Brien, S. (1990). "Turbo Pascal: Manual de referencia", McGraw-Hill, México, pp. 13-85.

- 35) Osman, M. E. (1975). Interaction of Starch with Other Components of Food Systems. *Food Technol.* 29 (4), 30-35.
- 36) Pomeranz, Y. (1971). "Bread Science and Technology", AVI, USA, pp.49-52.
- 37) Pomeranz, Y. (1987). "Modern Cereal Science and Technology", UCH Publishers, New York, pp. 248-252.
- 38) Potter, N. (1964). "La Ciencia de los Alimentos", Edutex S.A, México, pp. 524-534.
- 39) Quintin, O. J. (1984). "Tablas de valores nutritivos para cálculos dietéticos", Francisco Mendez Cervantes, México, pp. 25-27.
- 40) Rosenberg, U. y Bogl, W. (1987). Microwave Pasteurization, Sterilization, Blanching and Pest Control in the Food Industry. *Food Technol.* 41 (6), 92-99.
- 41) Rosenberg, U. y Bogl, W. (1987). Microwave, Thawing, Drying and Baking in the Food Industry. *Food Technol.* 41 (6), pp. 85-91.
- 42) Sánchez, T. A. (1985). "Principios Básicos de Calentamiento por Microondas en Alimentos", Tesis, F.E.S.-C., México, pp. 30-63.
- 43) Schiffmann, R. F. (1986). Food Product Development for Microwave Processing. *Food Technol.* 40 (1), 94-98.
- 44) Schiffmann, R.F. (1992). Microwave Processing in the U.S. Food Industry. *Food Technol.* 46 (12), 50-52.
- 45) Schlegel, W. (1992). Commercial pasteurization and sterilization of food products using microwaves technology. *Food Technol.* 46 (12), 62-63.
- 46) Sears, F. W., Zemansky, M. W. y Young, H. O. (1985). "Física Universitaria", Addison-Wesley Iberoamericana S.A., España, pp. 388-400.
- 47) Serway, R. A. (1992). "Física Tomo II", McGraw Hill, México, pp.1162-1164.
- 48) Shoemaker, G. (1981). "Experiments in Physical Chemistry", McGraw - Hill, New York, pp. 554-568.
- 49) Sisler, H. H. y VanderWerf, A. C. (1969). "Food Chemistry", Van Nostrans Reinhold Company, New York, pp. 337-345.
- 50) Smith, D. P. (1986). Food-Finishing Microwave Tunnel Utilizes Jet Impingement and Infrared Sensing for Process Control. *Food Technol.* 40 (1), pp. 113-116.
- 51) Soltan, W. J. (1986). "Practical Baking", AVI, USA, pp. 193-196.
- 52) Stipe, C.M. (1990). "Plastic materials which extend the performance of microwave packaging", Pack Expo '90, Chicago, pp.1-24.

- 53) Velasco, H. (1993). El Empaque: Un vendedor Extraordinario. *Empaque Performance*. 2 (19), 52-62.
- 54) Welby, J. R. (1991). "Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa", Limusa, México, pp. 494-498.
- 55) Windholz, M., Budavari, S., Stroumsos, Y. L. y Noether, F. M. (1976). "The Merck Index", Merck & Co; Inc, USA, pp. 692.

A N E X O A

MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EXPLÍCITO

El método de diferencias finitas permite resolver ecuaciones diferenciales con variables independientes espacio-temporales, tales como las ecuaciones de transferencia de calor.

En diversos problemas de ingeniería es necesario conocer la distribución de temperaturas de materiales sólidos, por lo que para ello se establece que la distribución de temperaturas en estado estacionario en un sistema bidimensional, se define por la ecuación de Laplace.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

A1.

Las derivadas de la Ecuación A1, se aproximan usando diferencias finitas, tomando como referencia el diagrama de la figura A1.

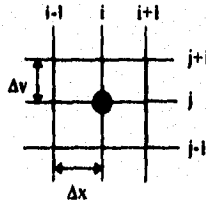


Figura A1.

Las aproximaciones por diferencias finitas son:

$$\frac{\delta T}{\delta x} \approx \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}$$

A2.

La segunda derivada de la Ecuación A2 para la coordenada "x" queda;

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\delta}{\delta x} \frac{\delta T}{\delta x} = \frac{\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x} - \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2}$$

A3.

Para la coordenada "y" es similar la deducción por lo que las temperaturas quedan:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta y^2}$$

A4

Si se supone que $\Delta x = \Delta y$, la ecuación de Laplace resuelta queda;

$$T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 4T_{i,j} = 0$$

A5.

La ecuación A5 se resuelve para cada nodo, por lo que mediante estas aproximaciones se resuelve el Laplaciano que se involucra en la 2a. ley de Fourier

El método para diferencias finitas explícito consiste en calcular las temperaturas del siguiente intervalo de tiempo tomado como referencias las temperaturas obtenidas en el intervalo de tiempo anterior. En el caso del primer intervalo de tiempo se considera la temperatura inicial para todos los nodos. (7)

A N E X O B

TABLAS DE ANOVA PARA LA PRUEBA DE REPETIBILIDAD EN LA VALIDACION DE TERMOPARES

TABLA B1.
ANOVA de Termopar 1

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	gl.	Cuadro de Med.	F	Nivel Sign.
Entre grupos	1.7500000	3	0.5833333	3.104	0.0556
Dentro de grupos	2.2550000	12	0.1879166		
Total	4.0000000	15			

TABLA B2.
ANOVA de Termopar 2

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	gl.	Cuadro de Med.	F	Nivel Sign.
Entre grupos	1.9218750	3	0.6406250	3.012	0.0721
Dentro de grupos	2.5525000	12	0.2127083		
Total	4.4743750	15			

TABLA B3.
ANOVA de Termopar 3

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	gl.	Cuadro de Med.	F	Nivel Sign.
Entre grupos	1.721875	3	0.5739583	4.167	0.0456
Dentro de grupos	1.652500	12	0.1377083		
Total	3.374375	15			

TABLA B4.
ANOVA de Termopar 4

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	gl.	Cuadro de Med.	F	Nivel Sign.
Entre grupos	2.3525000	3	0.7841667	2.070	0.1577
Dentro de grupos	4.5450000	12	0.3787500		
Total	6.8975000	15			

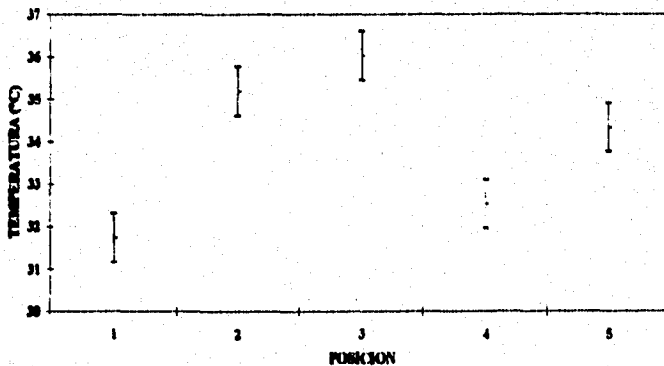
TABLA B5.
ANOVA de Termopar 3

Punto de variación	Suma de Cuadrados	g.l.	Cuadro de Med.	F	Nivel Sig.
Entre grupos	3.6450000	3	1.2150000	2.960	0.0889
Dentro de grupos	4.9250000	12	0.4104166		
Total	8.5700000	15			

TABLAS DE ANOVA Y GRAFICAS DE MEDIAS PARA LA DETERMINACION DE LA "ZONA CALIENTE".

TABLA B6
ANOVA a potencia de 72 W

Punto de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadro de Med.	F	Nivel Sig.
Covariable:	1958.6117	1	1958.6117	1000.000	0.0000
Tiempo	1958.6117	1	1958.6117	1000.000	0.0000
Efectos principales:	142.12982	4	35.532455	39.907	0.0000
Posición	142.12982	4	35.532455	39.9070	0.0000
Residual	43.628345	49	0.8903744		
Total	2144.3698	54			

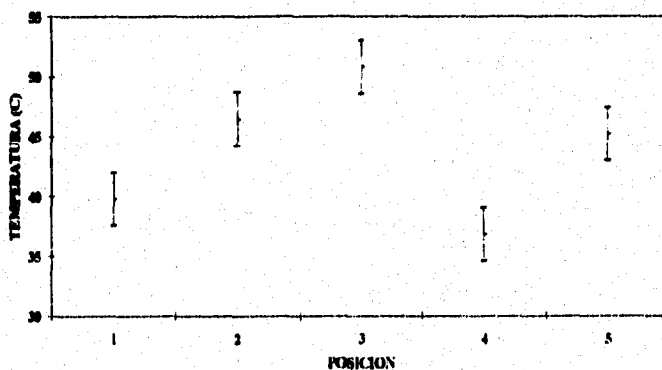


Gráfica B1

Valores medios de temperaturas para 5 posiciones a 72 W de potencia con un intervalo del 95 % de confianza.

TABLA B7
ANOVA a potencia de 216 W

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadro. de Med.	F	Nivel Sig.
Covariable:	5940.1023	1	5940.1023	451.155	0.0000
Tiempo	5940.1023	1	5940.1023	451.155	0.0000
Efectos principales:	1352.6516	4	338.16291	25.684	0.0000
Posición	1352.6516	4	338.16291	25.684	0.0000
Residual	645.15591	49	13.166447		
Total	7937.9098	54			



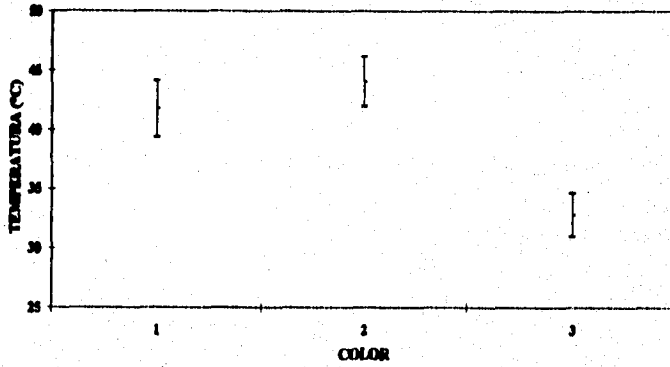
Gráfica B7

Valores medios de temperaturas para 5 posiciones a 216 W de potencia con un intervalo del 95 % de confianza.

TABLA DE ANOVA Y GRAFICA DE MEDIAS DE GEL PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL COLOR EN EL COMPORTAMIENTO TERMICO

TABLA B8
ANOVA de gel a potencia de 72 W

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadro. de Med.	F	Nivel Sig.
Covariable:	17094.463	1	17094.463	131.126	0.0000
Tiempo	17094.463	1	17094.463	131.126	0.0000
Efectos principales:	19620.630	2	9810.3148	75.251	0.0000
Color	19620.630	2	9810.3148	75.251	0.0000
Residual	45758.835	351	130.36705		
Total	82473.928	354			

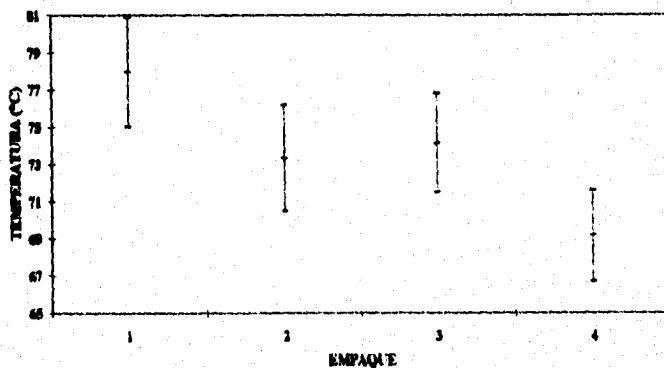


Gráfica 83
Valores medios de temperaturas para gel con 3 diferentes intensidades de color a 72 W de potencia con un intervalo del 95 % de confianza.

TABLAS DE ANOVA Y GRAFICAS DE MEDIAS DE BISQUET PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL EMPAQUE EN EL COMPORTAMIENTO TERMICO

TABLA 98
ANOVA a potencia de 72 W

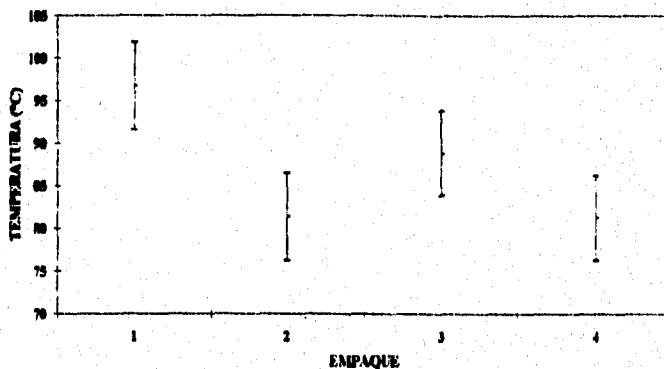
Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadr. de Med.	F	Nivel Sig.
Covariable:	275379.81	1	275379.81	673.434	0.0000
Tiempo	275379.81	1	275379.81	673.434	0.0000
Efectos principales:	48284.452	3	6094.817	39.359	0.0000
Empaque	48284.452	3	16094.817	39.359	0.0000
Residual	353714.84	865	408.91889		
Total	677379.10	869			



Gráfica B4
Valores medios de temperaturas para Bisquit con 4 diferentes empaques a 78 W de potencia con un intervalo del 95 % de confianza.

TABLA 10B
ANOVA a potencia de 216 W

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadra. de Med.	F	Nivel Sig.
Covariable:	152112.02	1	152112.02	346.528	0.0000
Tiempo	152112.02	1	152112.02	346.528	0.0000
Efectos principales:	12991.862	3	4330.6207	9.866	0.0000
Empaque	12991.862	3	4330.6207	9.866	0.0000
Residual	116324.32	265	438.93970		
Total	281428.20	269			



Gráfica B5
Valores medios de temperaturas para Bioquet con 4 diferentes empaques a 116 W de potencia con un intervalo del 95 % de confianza.

TABLA II B
ANOVA Multifactorial de 4 x 2 para empaque y potencia

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl.	Cuadro de Med.	F	Nivel Sig.
Covariable:	132225.02	1	130005.02	273.112	0.0000
Tiempo	132225.02	1	132225.02	273.112	0.0000
Efectos principales:	176331.72	3	58777.24	121.405	0.0000
A= Empaque	16159.13	2	8079.56	16.688	0.0000
B= Potencia	163250.30	1	163250.30	337.195	0.0000
Interacciones	3454.4640	2	1727.2320	3.568	0.0287
AxB	3454.4640	2	1727.2320	3.568	0.0287
Residual	386345.19	798	484.14184		
Total	698356.39	804			