

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE INGENIERIA EN ALIMENTOS

**Validación Experimental de un Software Asistido por Internet
para Describir el Proceso Combinado Escaldado -
Hidrogenfriado en Floretes de Brócoli**
(Brassica oleracea L. var italica)

Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al grado de
Licenciado en Ingeniería en Alimentos

Miguel Angel Gallardo Castro

VALDIVIA – CHILE

2004

PROFESOR PATROCINANTE

.....
Sr. Elton Francisco Morales Blancas
Ingeniero en Industrias Alimentarias, Mg. Sc
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL)

PROFESOR INFORMANTE

.....
Sr. Bernardo Carrillo López
Ingeniero Agrónomo, Ms. Sc
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL)

PROFESOR INFORMANTE

.....
Sr. Kong Shun Ah-Hen
Ingeniero de Alimentos, Dr. Ing.
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL)

*De manera muy especial a mis padres, Egon y Alda,
a quienes dedico con todo mi amor este triunfo...
muchas gracias por todo lo que me han dado...
los amo mucho y siempre los tendré
en mi corazón.*

*A Dios que me ha iluminado en este largo camino,
muchas gracias.*

AGRADECIMIENTOS

- A mi profesor patrocinante Sr. Elton Morales Blancas por su paciencia, comprensión, consejo, apoyo incondicional, buena voluntad, disponibilidad y motivación durante todo mi trabajo de tesis.
- A mis profesores informantes Sr. Bernardo Carrillo López y Sr. Kong Shun Ah-Hen quienes siempre se demostraron prestos en apoyarme y colaborar conmigo ante todas mis inquietudes.
- A la Sra. Marcia Costa Lobo quien me brindó mucha energía y motivación para lograr este objetivo.
- A mis compañeros Francisco Pino y Cristian Rodríguez, quienes me apoyaron en el desarrollo técnico de mi trabajo.
- A todos mis compañeros y amigos que siempre me motivaron y se mostraron interesados en ayudarme, en forma especial al Yoyo y a sus padres quienes me acogieron en su hogar.
- A todos los profesores y sobre todos a los docentes del ICYTAL que me entregaron las herramientas necesarias para poder culminar esta etapa.
- Con mucho cariño y gratitud a mis hermanas Soledad y Ghislaine, también a mi hermano Egon, mi cuñado Luis Eduardo y mis sobrinas queridas Rocío Alejandra, Francisca Andrea y Angélica María.
- Quiero agradarte también a ti Daniela Belén por toda tu ayuda, apoyo y paciencia que tuviste conmigo en cada momento, incluso por difíciles que ellos hayan sido, gracias.
- A Gladys y a Luisa por cuidar de mis padres.
- A todas aquellas personas como José, Tito, Alex y Otto que de alguna u otra manera me asistieron en mis requerimientos.

INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCION	1
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Proceso global escaldado e hidrogenfriado	3
2.1.1	Definición y objetivos del escaldado	3
2.1.2	Métodos de escaldado	5
2.1.3	Etapa de enfriamiento	8
2.1.4	Sistemas enzimáticos asociados al proceso de escaldado	9
2.1.5	Tiempos de escaldado	10
2.2	Transferencia de calor asociada al proceso de escaldado e hidrogenfriado	11
2.2.1	Mecanismos de transferencia de calor	12
2.2.2	Ecuación de transferencia de calor por conducción en estado transiente	12
2.2.3	Ecuación general de transferencia de calor por convección	14
2.2.4	Condiciones de frontera	14
2.2.4.1	Condición de primera clase	14
2.2.4.2	Condición de segunda clase	15
2.2.4.3	Condición de tercera clase	15
2.2.5	Parámetros de la velocidad de transferencia de calor	15
2.2.5.1	Propiedades termofísicas de los alimentos	15
2.2.5.1.1	Conductividad térmica	16
2.2.5.1.2	Calor específico	17

2.2.5.1.3	Densidad	18
2.2.5.1.4	Difusividad térmica	18
2.2.5.2	Coefficiente convectivo de transferencia de calor	19
2.3	Predicción de tiempos y perfiles de temperatura por métodos numéricos	20
2.4	Generalidades del Brócoli	24
2.4.1	Centro de origen y difusión	24
2.4.2	Características botánicas y órgano de consumo	24
2.4.3	Composición y usos	24
2.4.4	Almacenamiento	25
2.4.5	Importancia del cultivo en Chile	25
2.4.6	Tipos o estilos de brócoli congelado	25
3	MATERIAL Y METODO	27
3.1	Lugar de ejecución	27
3.2	Materiales y equipos	27
3.2.1	Material biológico	27
3.2.2	Equipo de hidrocalentamiento	27
3.2.3	Equipo de hidrogenfriamiento	27
3.2.4	Sistema de adquisición de datos de temperaturas	28
3.2.5	Termocuplas	28
3.2.6	Otros	28
3.3	Métodos	30
3.3.1	Calibración de termocuplas	30
3.3.2	Inserción de termocuplas	30
3.3.3	Determinación experimental del punto de más lento calentamiento/enfriamiento	31
3.3.4	Obtención de perfiles de temperatura experimentales del punto de más lento calentamiento/enfriamiento	32
3.3.5	Modelo de conducción de calor en diferencias finitas	33

3.3.6	Software para cálculos en Ingeniería de Procesos	36
3.3.6.1	Software Foodheatcool v 1.0	36
3.3.6.2	Software Foodproperty v 1.0	37
3.3.7	Ingeniería Reversa y aplicaciones CAE (Computer-Aided Engineering)	38
3.3.7.1	Digitalización 3D	38
3.3.7.2	Análisis de Elementos Finitos	38
3.3.8	Determinación del ajuste de las curvas simuladas por Foodheatcool v 1.0	39
4	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	40
4.1	Determinación experimental del punto de más lento calentamiento/enfriamiento	40
4.2	Verificación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento	45
4.3	Forma irregular compleja versus cilindro infinito	48
4.4	Obtención de perfiles de temperatura experimentales y simulados	49
4.4.1	Influencia de la composición	49
4.4.2	Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados	52
5	CONCLUSIONES	58
6	RESUMEN	59
	SUMMARY	60
7	BIBLIOGRAFIA	61
	ANEXOS	72

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Elemento diferencial de una plancha	21
2	Sistema de escaldado e hidrogenfriado y de adquisición de datos de temperatura	29
3	Inserción de termocuplas	31
4	Estructura, distribución de zonas y ubicación de termocuplas en florete de brócoli de 70 mm	31
5	Perfiles de temperatura experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado (95°C) - hidrogenfriado (2°C) en floretes de brócoli de 70 mm	41
6	Perfiles de temperatura experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado (75°C) - hidrogenfriado (2°C) en tallo de floretes de brócoli de 70 mm	42
7	Perfiles de temperatura experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado (85°C) - hidrogenfriado (2°C) en tallo de floretes de brócoli de 70 mm	43
8	Perfiles de temperatura experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado (95°C) - hidrogenfriado (2°C) en tallo de floretes de brócoli de 70 mm	44
9	Réplica en yeso de un florete de brócoli de 50 mm	45

10	Modelo geométrico 3D de un florete de brócoli de 50 mm	46
11	Penetración de calor en florete de brócoli de 70 mm	46
12	Penetración de calor en florete de brócoli de 50 mm	47
13	Perfiles de temperatura simulados por Foodheatcool v 1.0 y ALGOR v 15 durante el proceso de escaldado (95°C) en tallo de floretes de brócoli de 50 mm	48
14	Perfiles de temperatura simulados durante el proceso combinado de escaldado (95°C) - hidrogenfriado (2°C) para distintas composiciones de brócoli.	51
15	Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso combinado de escaldado (65°C) - hidrogenfriado (2°C) en floretes de brócoli de 50 mm, resultado de tres repeticiones	53
16	Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso combinado de escaldado (75°C) - hidrogenfriado (2°C) en floretes de brócoli de 50 mm, resultado de tres repeticiones	54
17	Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso combinado de escaldado (85°C) - hidrogenfriado (2°C) en floretes de brócoli de 50 mm, resultado de tres repeticiones	55
18	Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso combinado de escaldado (95°C) - hidrogenfriado (2°C) en floretes de brócoli de 50 mm, resultado de tres repeticiones	56

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Tiempos de escaldado en agua a 95°C	11
2	Correlaciones de CHOI y OKOS (1986) para determinar conductividad térmica (k), densidad (ρ), calor específico (Cp) y difusividad térmica (α)	17
3	Valores aproximados del coeficiente convectivo de transferencia de calor	20
4	Esquema de diferencias finitas comúnmente utilizados para la modelación del proceso de calentamiento y enfriamiento unidireccional de productos vegetales. Caso: plancha infinita	23
5	Parámetros experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de 70 mm	32
6	Parámetros experimentales para la obtención de perfiles de temperatura durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de 50 mm	32
7	Composición del brócoli	50
8	Propiedades termofísicas estimadas del brócoli a 20 °C	50
9	Raíz cuadrada del error promedio de los perfiles simulados durante el proceso combinado de escaldado (95°C) – hidrogenfriado (2°C), para distintas composiciones de brócoli	52

10	Resumen de la raíz cuadrada del error promedio durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de brócoli de 50 mm	57
----	---	----

INDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
1	Detalle de la raíz cuadrada del error promedio durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de brócoli de 50 mm 73
2	Ventanas del software on-line Foodheatcool v 1.0 74

NOMENCLATURA

Símbolos

A	Area (m^2)
C	Calor específico volumétrico ($J/m^3 \text{ kg}$)
Cp	Calor específico ($J/kg \text{ K}$)
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor ($W/m^2 \text{ K}$)
K, k	Conductividad térmica ($W/m \text{ K}$)
L	Longitud (m)
M	Masa (kg)
N	Número de puntos o datos
n	Número de elementos de volumen
q	Flujo de calor (W)
r	Radio (m) dirección radial, distancia
T	Temperatura ($^{\circ}C$ o K)
t	Tiempo (s)
V	Volumen (m^3)
X	Fracción en peso de un componente

Superíndices y subíndices

a, m, ∞	Medio fluido
H	Final de hidrocalentamiento
i	Experimental
i*	Simulado
0, in	Inicial
s, sup	Superficial
w	Agua total

Números adimensionales

Bi	Número de Biot
Fo	Número de Fourier
Gr	Número de Grashof
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds
w	Agua

Símbolos griegos

ρ	Densidad (kg/m^3)
α	Difusividad térmica (m^2/s)
β_1	Razón entre la segunda dimensión y la dimensión más pequeña
β_2	Razón entre la tercera dimensión y la dimensión más pequeña
Δ	Diferencial

1 INTRODUCCION

El brócoli es una hortaliza que en las últimas décadas ha visto incrementado su cultivo en diversas áreas del mundo, presentando una gran tasa de expansión y un aumento notable de su producción. Esto debido a una serie de compuestos fenólicos y antioxidantes, a los cuales se les atribuyen efectos benéficos para la salud, como la prevención del cáncer y diversas enfermedades. La mayor cantidad del consumo de esta hortaliza es en estado fresco; sin embargo, en los últimos años se ha visto incrementado el consumo de brócoli congelado, debido a los cambios de hábitos de los consumidores de las grandes ciudades. El brócoli congelado necesariamente requiere de una etapa de escaldado durante su procesamiento, siendo una etapa crítica para la optimización de la calidad nutricional y sensorial del producto.

El escaldado es un tratamiento térmico corto, que se aplica a los productos vegetales antes de realizar un tratamiento de conservación que puede ser la congelación, enlatado o deshidratación. Existen distintas técnicas de escaldado, con agua o vapor y cada producto requiere un tratamiento bajo condiciones específicas. El objetivo principal de este tratamiento es inactivar las enzimas que pueden deteriorar la calidad del producto durante su almacenamiento. La inactivación enzimática estará en función directa de la velocidad de transferencia de calor desde el medio circundante al producto mediante el mecanismo de convección y en el interior del producto mediante la conducción.

El escaldado es una de las operaciones que demandan un mayor consumo de agua y energía produciendo un mayor volumen de efluentes, y un mayor costo e impacto ambiental. Además, la aplicación de este tratamiento térmico sin un adecuado control puede ocasionar problemas relacionados con la calidad sensorial del producto como color, textura, sabor, y calidad nutritiva.

Actualmente existen software para solucionar problemas de Ingeniería basados en métodos numéricos, que permiten simular y evaluar la cinética de transferencia de

calor durante los procesos de escaldado e hidrogenfriado de alimentos de formas regulares e irregulares complejas. De esta manera las empresas procesadoras de alimentos podrían reducir la realización de pruebas experimentales que implican costos elevados y la inversión de tiempo excesivo para llegar a determinar las condiciones óptimas de trabajo que minimicen las pérdidas nutricionales y sensoriales.

Basándose en los antecedentes citados el objetivo general fue:

- Evaluar la utilización de un software asistido por Internet desarrollado en el ICYTAL-UACH basado en el método de diferencias finitas, denominado Foodheatcool v 1.0, para calcular tiempos de escaldado e hidrogenfriado en floretes de brócoli.

Para lograr el objetivo general la hipótesis y objetivos específicos fueron:

Hipótesis:

- Es posible considerar que la velocidad de penetración de calor en el punto de más lento calentamiento/enfriamiento de un florete de brócoli es equivalente a la de un cilindro infinito del mismo calibre.

Objetivos específicos:

- Caracterizar la forma irregular compleja del florete de brócoli y evaluar la factibilidad de considerarlo como una forma regular para efectos de los cálculos térmicos.
- Determinar el centro térmico del florete de brócoli, definiéndose éste como el punto de más lento calentamiento para el caso del escaldado o el punto de más lento enfriamiento para el caso del hidrogenfriado.
- Evaluar la bondad del ajuste entre los perfiles de temperatura experimentales y los simulados con el software Foodheatcool v. 1.0.

2 REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Proceso global escaldado e hidrogenfriado

2.1.1 Definición y objetivos del escaldado. El escaldado es un tratamiento térmico corto que involucra la exposición de los tejidos vegetales a alguna forma de calor, usualmente por exposición a vapor o agua caliente por un tiempo predeterminado a una temperatura específica (LUH y LORENZO, 1988; BARRET y THEERAKULRAIT, 1995). El propósito del escaldado es preparar a los productos vegetales para la siguiente etapa de los procesos de congelación, deshidratación y elaboración de conservas (BURNETTE, 1977; LUND, 1977; HALPIN y LEE, 1987; WOODROOF, 1988). Este proceso consiste en elevar la temperatura de la materia prima, exponiéndola a un medio calórico húmedo (generalmente entre 70°C - 100°C), mantener dicha temperatura por un tiempo determinado y luego enfriar el producto rápidamente a una temperatura cercana a la ambiental (FELLOWS, 1988; ACHONDO, 1991), para así evitar que el producto alcance la precocción y en algunos casos la cocción.

El escaldado persigue distintos objetivos:

- Limpieza del producto (HERSOM y HULLAND, 1984; SHAMS y THOMPSON, 1987; RESS y BETTISON, 1993).
- Inhibir las reacciones enzimáticas indeseables, por destrucción térmica de las enzimas responsables presentes en los vegetales que en otro caso darían lugar a aromas, sabores o coloraciones extrañas y causarían la pérdida de vitamina C; provocando un efecto adverso en la calidad y valor nutritivo del producto. (BURNETTE, 1977; LUND, 1977; SINGH y CHEN, 1980; HERSOM y HULLAND, 1984; POULSEN, 1986; SHAMS y THOMPSON, 1987; KARLSSON y LUH, 1988; RESS y BETTISON, 1993; BARRET y THEERAKULRAIT, 1995).

- Posibilitar un mejor aprovechamiento de los recipientes al disminuir el tamaño de la materia prima como consecuencia de la coagulación forzada de las proteínas y contracción por la liberación de agua (POULSEN, 1986).
- Expulsar los gases (aire) ocluidos en los espacios intercelulares de las hortalizas (GANTHAVORN y POWERS, 1988) evitando, por lo tanto, el aumento de la presión desarrollada en las conservas durante el procesamiento debido a la expansión de los gases presentes (SHAMS y THOMPSON, 1987; RESS y BETTISON, 1993; LUH y KEAN, 1988; BARRET y THEERAKULRAIT, 1995), es decir se previene la reducción del vacío (HERSOM y HULLAND, 1984; LUH y KEAN, 1988).
- Mejorar el sabor (LUND, 1977; HERSOM y HULLAND, 1984) y estabilizar el color verde de los vegetales por activación de las clorofilas en sus respectivos clorofílicos (FENNEMA, 1993).
- Reducir la carga microbiana viable, ya sean células vegetativas, levaduras y/o hongos (POULSEN, 1986; BARRET y THEERAKULRAIT, 1995).
- Incremento de textura en algunas verduras, atribuido a la activación de la pectinmetilesterasa, que cataliza la conversión de la pectina en ácidos pectínicos de naturaleza iónica, que facilita su interacción con iones bivalentes como el calcio, que aumenta la rigidez de las estructuras (FENNEMA, 1993).
- Disminución del tiempo de cocimiento del producto final (POULSEN, 1986).

Otros efectos del escaldado considerados positivos son la reducción de posibles residuos químicos, lixiviación de sustancias naturales indeseables de algunas hortalizas, como nitratos, nitritos y oxalatos solubles de zanahoria y espinacas, rutina coloreada del espárrago, compuestos indeseables de las brassicas entre otras (OLHAGARAY, 1991).

Muchos vegetales congelados, así como los deshidratados y enlatados, requieren del escaldado si han de ser almacenados por periodos de tiempo prolongados (KARLSSON y LUH, 1988; SOMOGYI y LUH, 1988). Con el tiempo, los vegetales sin escaldar gradualmente llegan a ser más fibrosos, menos dulces e insípidos y sin sabor ni aroma atractivos; cualidades que siguen deteriorándose, perdiendo, en muchos casos, la frescura después de 6 meses. Después de un año o más el sabor y el aroma llegan a ser

desagradables al cocerlos, con una pronunciada cualidad similar al heno (WOODROOF, 1988).

El sobreescaldado produce una excesiva lixiviación de minerales, pigmentos, vitaminas, pérdida de sabor y valor nutricional. Por ejemplo, en el caso de guisantes (arvejas), la pérdida de nutrientes es proporcional al área superficial del producto (Selman *et al.*, citado por SHAMS y THOMPSON, 1987). Por otro lado, después de almacenar por 4 meses los vegetales subescaldados comienzan a desarrollar un sabor similar al heno; mientras que los vegetales sobreescaldados presentan deficiencias en el sabor (WOODROOF, 1988).

2.1.2 Métodos de escaldado. Diversos métodos son los que se emplean para escaldar productos vegetales; la inmersión en agua a temperaturas entre 80 y 100°C seguido por inmersión en agua fría, es el más común de los métodos de escaldado (WOODROOF, 1988; HOLDSWORTH, 1993). Generalmente se utilizan dos tipos de equipos para este propósito; el más importante es el escaldador giratorio de inmersión continua en el cual los productos son transportados a través de un tanque o tambor estático con agua caliente utilizando un transportador en espiral con lo que el producto es sumergido constantemente en el agua caliente (HERSOM y HULLAND, 1984; HOLDSWORTH, 1993). La temperatura del agua se mantiene mediante el calentamiento directo o indirecto con vapor. Este tipo de escaldador permite el procesamiento de la mayoría de los productos vegetales consiguiéndose una amplia variación en los tiempos de residencia para cada uno de ellos de acuerdo a sus necesidades individuales (HOLDSWORTH, 1993). El otro equipo es el escaldador hidráulico de tipo tubo en el que el producto se bombea con agua caliente a lo largo de una tubería, de cuyas paredes salen chorros de vapor que se utilizan para calentar el agua y facilitar el flujo del producto (HERMSON y HULLAND, 1984).

Los métodos de escaldado por inmersión de los productos en agua presentan la objeción de necesitar grandes volúmenes de agua. Dado que existe contacto directo del medio de escaldado con el producto, se pierden algunos nutrientes (LAZAR *et al.*, 1971; HERSOM y HULLAND, 1984) por una doble lixiviación del producto al ser expuestos

al agua de calentamiento y luego a la de enfriamiento (HERSOM y HULLAND, 1984; WOODROOF, 1988). La doble pérdida de nutrientes puede ser reducida mediante un escaldado serial, esto es, usando la misma agua de escaldado y enfriado en varias oportunidades. Ya que la pérdida de compuestos hidrosolubles es estabilizada después de tener una acumulación de nutrientes lixiviados en el agua de escaldado, la adición de ciertos minerales al agua de escaldado ayuda a estabilizar el proceso de lixiviación (WOODROOF, 1988).

Otra objeción al uso del escaldado convencional es señalada por LAZAR **et al.** (1971) y HURT (1979), quienes acusan una elevada demanda biológica de oxígeno (DBO) en los efluentes debido a la lixiviación de nutrientes. El escaldado convencional, constituye una gran fuente de contaminación; sobre el 50% de la producción de DBO es debido al escaldado durante el proceso de enlatado de productos vegetales (Weckel **et al.**, citado por HURT, 1979). Al respecto diversos estudios han sido desarrollados por la National Cannery Association (ahora National Food Processors Association), citado por HURT (1979), con el objetivo de reducir esta fuente de contaminación y potencial fuente de nutrientes. Se ha estudiado el escaldado con agua, vapor, microondas y gas caliente con mejoramiento en la retención de nutrientes como uno de los objetivos centrales.

Desde 1940, el vapor se ha convertido en una alternativa frente al agua caliente para el escaldado de muchos vegetales excepto verduras, porque estas últimas tienden a adherirse resultando en un escaldado desigual (WOODROOF, 1988). Los escaldadores de vapor continuo son mecánicamente más complejos; en ellos el producto se mueve por un tanque que contiene vapor de agua.

El vapor es rápido y causa menos pérdidas por lixiviación de nutrientes (LAZAR **et al.**, 1971; LUND **et al.**, 1972; RESS y BETTISON, 1993). Sin embargo, los beneficios ganados por el vapor pueden perderse por la excesiva cantidad de agua usada para el enfriamiento; por lo tanto, nutricionalmente hay pocas ventajas del vapor sobre el agua para escaldar (DIETRICH **et al.**, 1970). Asimismo, aunque el vapor permite obtener menores tiempos de escaldado, su costo de implementación es bastante elevado (WOODROOF, 1988). Además, debe considerarse que el escaldado con vapor consume

una gran cantidad de energía y es una costosa operación comercial en términos energéticos, por ejemplo, el 34% de la energía total requerida en el procesamiento de espinacas es usada por el escaldado; de este 34% solamente el 31% es requerido para escaldar el producto, mientras que el 69% restante se pierde por ineficiencia de los equipos escaldadores (RUMSEY *et al.*, 1981; DRAKE y SWANSON, 1986).

Desde el punto de vista de la limpieza del alimento esta es limitada y se requieren limpiadores adicionales (FELLOWS, 1988).

Desde 1950 la tendencia es escaldar en menor tiempo, con menos agua y menos energía. Una forma es escaldar bajo un régimen de alta temperatura durante corto tiempo o HTST (High Temperature Short Time); al respecto, DRAKE y CARMICHAEL (1986) señalan que las diferencias de calidad en vegetales procesados pueden ser controladas con este método; además de requerir menos energía, la alta calidad exigida en vegetales congelados puede ser obtenida escaldando con vapor bajo régimen HTST.

GIBERT *et al.* (1980) han propuesto un método de escaldado con gas en un lecho fluidizado especial, el "lecho giratorio", donde el gas fluidizante es una mezcla de aire y vapor saturado; este método de escaldado es aplicable para algunos alimentos en particular, como papas y zanahorias. Sus principales características son:

- Tratamiento térmico rápido y uniforme del producto, lo cual es el resultado de un buen mezclado de las partículas dentro del lecho.
- Reducción sustancial del volumen de los efluentes contaminantes, comparado con los métodos tradicionales.

El método de escaldado rápido individual o IQB (Individual Quick Blanching), ha sido descrito por LAZAR *et al.* (1971). Este tipo de escaldado se basa en someter las partículas del alimento, durante un tiempo relativamente corto, a un ambiente de vapor de agua y después acumular en un lecho profundo sin aplicación posterior de calor hasta que tiene lugar el equilibrio de la temperatura. De esta manera, se puede considerar que el alimento es sometido a un escaldado de dos etapas: la primera de calentamiento y luego una etapa de retención. El calentamiento es realizado en una unidad de condensación de vapor donde se añade el calor necesario para elevar la temperatura promedio de la masa de producto a la correspondiente para la desactivación enzimática.

La segunda etapa es una retención adiabática donde los alimentos, luego de alcanzar una temperatura uniforme de equilibrio, son mantenidos por un tiempo suficiente para desactivar las enzimas, y para alcanzar la textura deseada. La retención de nutrientes, controlado como ácido ascórbico, resultó buena promediando sobre el 80%, dependiendo del producto (CUMMING **et al.** 1981; 1985).

2.1.3 Etapa de enfriamiento. Como ya se ha mencionado anteriormente, en el procesamiento de vegetales, el enfriamiento es la etapa posterior al escaldado y tiene igual importancia para la calidad del producto final. La zona térmica entre 10°C y 50°C constituye una fase crítica para la calidad del producto (gran fragilidad ante recontaminación con microorganismos, acusadas modificaciones de color, grandes pérdidas de nutrientes, pero especialmente mermas en contenido vitamínico y empeoramiento del aroma). Por estas razones, se impone el principio de enfriar, hasta temperatura ambiente o menor, las materias primas escaldadas, inmediatamente después de recibir el tratamiento térmico. Para tal fin se sumerge el producto en baños de agua fría (5°C - 20°C) o se pulveriza sobre las materias primas. Otra forma es someterlos a la acción de corriente de aire refrigerado (LEE, 1958; PLANK, 1963; TIMBERS **et al.**, 1984; GRUDA y POSTOLSKI, 1986).

Se ha sugerido el enfriamiento evaporativo como alternativa del agua fría, pero el grado de enfriamiento está limitado por la temperatura de bulbo húmedo del aire utilizado (COFFELT y WINTER, 1973) y su implementación está limitada por la pérdida de peso del producto debido a la evaporación (BOMBEN, 1977).

El reciclaje del agua es otra alternativa propuesta. Al respecto, CARROAD **et al.** (1980) estudiaron el rendimiento y pérdida de sólidos en el escaldado de brócolis con agua y vapor, y posterior enfriamiento evaporativo; concluyeron que el reciclaje del agua de escaldado puede dar como resultado una menor pérdida de sólidos. SWARTZ y CARROAD (1981) describieron un sistema de enfriamiento con reciclaje de agua y evaluaron las consecuencias microbiológicas y de calidad debido al reciclaje del agua en los sistemas de escaldado e hidrogenfriado. Establecieron que la concentración de ácido ascórbico, el porcentaje total de sólidos y el porcentaje de retención de clorofila en

brócolis se mantuvieron en niveles altos después del escaldado e hidrogenfrio. El recuento bacteriano fue muy bajo y demostraron que no hay incremento en el contenido microbiológico como función del tiempo de reciclaje. El recuento fue menor que en las materias primas, de lo que se desprende que el reciclaje del agua de escaldado y la implementación de este sistema es una alternativa viable.

Es importante el enfriamiento del producto después del proceso de escaldado, por cuanto da término al proceso de calentamiento, como también contribuye a mejorar el rendimiento de la etapa siguiente, para el caso de la industria de congelados.

Los diversos autores recomiendan uno u otro método de escaldado y enfriado para uno u otro producto; sin embargo, la elección del método de escaldado y enfriado apunta al ahorro energético y económico y a la disminución de la pérdida de nutrientes, para mejorar el valor nutricional y la textura de los vegetales procesados (HURT, 1979). Lo anterior se traduce en el requerimiento de un menor tiempo de residencia del producto en los aparatos de escaldado y enfriado; lo que, indudablemente, conlleva a estudiar la cinética del proceso global escaldado-enfriado (AGUILERA, 1996)

2.1.4 Sistemas enzimáticos asociados al proceso de escaldado. La eficacia del proceso de escaldado es determinada experimentalmente por la desactivación parcial o total de las enzimas peroxidasa, catalasa, lipoxigenasa y/o polifenoloxidasas (DIETRICH *et al.*, 1970; POWERS *et al.*, 1984; LEONI *et al.*, 1985; GARROTE *et al.*, 1987; HALPIN y LEE, 1987; GHANTAVORN y POWERS, 1988; FENNEMA, 1993; BARRET y THEERAKULRAIT, 1995). De éstas, la catalasa y la peroxidasa son las más termoresistentes y habitualmente son utilizadas como indicadores de la eficiencia del escaldado (BURNETTE, 1977; HALPIN y LEE, 1987; SOMOGYI y LUH, 1988; WOODROOF, 1988; HOLDSWORTH, 1993).

La cinética de desactivación enzimática está en función directa de la cinética de transferencia de calor que ocurre entre el medio de calentamiento y la superficie del producto, y luego dentro del propio producto. La cinética del proceso de escaldado se traduce entonces en un tiempo de proceso necesario para que el calor requerido para

desactivar las enzimas se transfiera desde el medio a la superficie del producto, y luego, de la superficie al centro de este (ORDOÑEZ, 1996).

2.1.5 Tiempos de escaldado. Desde el punto de vista ingenieril el tiempo de escaldado e hidrogenfriado como proceso global representa el tiempo de residencia del producto en el aparato escaldador/hidrogenfriador y éste depende de los siguientes parámetros:

- Temperatura del baño de escaldado e hidrogenfriado.
- Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h).
- Temperatura inicial y final del producto.
- Tamaño y geometría del producto.
- Propiedades termofísicas del producto, tales como, calor específico, conductividad térmica y densidad.
- Método de calentamiento (baño de inmersión, fluido pasando a través del producto o viceversa).

Desde el punto de vista tecnológico, el tiempo de proceso dependerá de la actividad enzimática de la materia prima, de su estructura histológica, que determina la capacidad de transmisión del calor de los tejidos, y de la resistencia específica frente a la acción de temperaturas elevadas (WOODROOF, 1988)

Para calcular los tiempos de escaldado e hidrogenfriado se emplea la teoría de transferencia de calor en estado transiente por conducción sujeto a condiciones límites convectivas. El problema es enfocado a buscar el tiempo necesario para que el centro del producto alcance la temperatura de desactivación enzimática generalmente de las más termoresistentes (catalasa, peroxidasa).

Los tiempos y temperaturas de escaldado sugeridos en la literatura para diversos productos varían en un amplio rango y frecuentemente no especifican todos los parámetros de la cinética de transferencia de calor citados anteriormente (CUADRO 1).

CUADRO 1. Tiempos de escaldado en agua a 95°C.

<i>Producto</i>	<i>Tiempo (min.)</i>
Alcachofas	5 - 9
Apio	2
Brócolis	2 - 3
Coles de Bruselas	4 - 5
Espárragos	2 - 5
Espinacas	2
Guisantes	1 - 2
Inflorescencias de coliflor	3 - 4
Judías verdes	2 - 3
Mazorca de maíz	6 - 11
Zanahorias	2 - 5

FUENTE: Adaptado de LUH y LORENZO (1988)

De la evidencia expuesta, se desprende que en la práctica son de poca utilidad para el diseño y evaluación de instalaciones y procesos. Por otro lado, el establecimiento de las variables de mayor importancia, en cuanto a su incidencia en el tiempo de escaldado e hidrogenfriado, conllevaría al desarrollo de un gran número de pruebas experimentales al nivel de laboratorio y/o planta piloto, que por motivos económicos, principalmente, es difícil o imposible realizar.

Todo esto se traduce en la necesidad de revisar la teoría de la transferencia de calor, para lo cual, en la literatura se dispone de diversos métodos, analíticos, aproximados, y puramente numéricos que permiten calcular el tiempo de calentamiento y enfriamiento necesarios para alcanzar el propósito tecnológico deseado durante el proceso de escaldado.

2.2 Transferencia de calor asociada al proceso de escaldado e hidrogenfriado

Antes de que un producto tratado térmicamente alcance condiciones de equilibrio, debe transcurrir un intervalo de tiempo en que la temperatura cambia con la posición y el tiempo, en un proceso conocido como transferencia de calor transiente. Este proceso adquiere especial importancia por la cantidad de procesos asociados al

calentamiento y enfriamiento en la industria alimentaria, entre los que se incluye el escaldado e hidrogenfriado de productos vegetales.

La transferencia de calor en estado transiente es de vital importancia en el proceso de desactivación enzimática, así como en la degradación de factores de calidad, asociados al efecto de la temperatura sobre los componentes biológicos involucrados, durante el período de calentamiento así como durante el enfriamiento (STUMBO, 1965; LUNA *et al.*, 1986; GARROTE *et al.*, 1987; HALPIN y LEE, 1987).

2.2.1 Mecanismos de transferencia de calor. La transferencia de calor puede verificarse por uno o más de los tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

La conducción de calor se verifica en el interior de un cuerpo sólido o desde un cuerpo a otro por intercambio de energía cinética entre las moléculas, sin que se verifique un desplazamiento real de aquellas (HELDMAN y LUND, 1992).

La convección es la transferencia de calor de un punto a otro dentro de un fluido, gas, o líquido por mezcla de una porción de este con otra. En la convección natural el movimiento del fluido es netamente por diferencias de densidad resultante de la diferencia de temperatura; en la convección forzada el movimiento se produce por medios mecánicos (KNUDSEN *et al.*, 1984).

La radiación térmica, puede decirse que ella corresponde a la transmisión neta de calor de un cuerpo a otro de menor temperatura por medio de ondas a través del espacio (KNUDSEN *et al.*, 1984).

El escaldado e hidrogenfriado, involucran dos de los tres mecanismos de transferencia de calor conocidos; estos son la convección y la conducción. El mecanismo de radiación no se presenta en estos casos ya que éste es relevante sólo cuando la transferencia de calor se manifiesta a través del espacio o de los gases, y no a través de los fluidos utilizados en los procesos en estudio, como el agua o el vapor (GEANKOPLIS, 1986).

2.2.2 Ecuación de transferencia de calor por conducción en estado transiente. La ley básica que da relación entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura, es

atribuida al físico francés Joseph Fourier quien desarrolló esta ley basándose en observaciones experimentales.

La ecuación de difusión o de Fourier, en coordenadas cartesianas en dirección del eje x , es expresada como:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Donde el signo negativo indica que el flujo de calor es en dirección de caída de temperatura, con el fin de satisfacer la segunda ley de la termodinámica.

Si se conoce, o se puede determinar la temperatura de un sólido en función de las coordenadas espaciales y del tiempo, resulta posible hallar el flujo de calor en cualquier punto y en cualquier dirección mediante una diferenciación adecuada. Un determinado problema se aborda normalmente resolviendo la ecuación diferencial que rige la distribución de la temperatura de una sustancia homogénea y haciendo que dicha solución se ajuste a las condiciones iniciales o límites establecidas.

En el desarrollo de la ecuación de conducción de calor, una de las simplificaciones más utilizada es la de considerar que la velocidad de generación de calor por respiración es despreciable con respecto a la velocidad de transferencia térmica entre el producto y el medio circundante. Awberry, citado por GAFFNEY *et al.* (1985) calculó en 0,023 °C el exceso de temperatura en el centro de una manzana, debido a la respiración; por este motivo, la generación de calor no será considerada en el presente trabajo.

La deducción de la ecuación global de transferencia de calor en estado transiente se puede obtener tomando un elemento diferencial de volumen y haciendo un balance de energía en el elemento de volumen. Así para geometrías básicas se tiene:

Para un paralelepípedo:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

Para una esfera:

$$\frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

Para un cilindro infinito:

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

Las ecuaciones presentadas anteriormente corresponden a la solución de la transferencia de calor en estado transiente sin cambio de fase.

2.2.3 Ecuación general de transferencia de calor por convección. Cuando el fluido, gas o líquido que rodea la superficie del sólido tiene movimiento convectivo, natural o forzado, la velocidad de transferencia de calor del sólido al fluido (o viceversa), se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton (BIRD et al., 1960; GEANKOPLIS, 1986; SINGH y HELDMAN, 1993):

$$q = hA(T_s - T_m) \quad (2.5)$$

Se ha establecido que el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) es una función de la geometría del alimento, de las propiedades del fluido, de la velocidad del flujo y de la diferencia de temperatura.

2.2.4 Condiciones de frontera. Las ecuaciones diferenciales de conducción de calor en estado transiente presentadas anteriormente pueden tener numerosas soluciones a menos que se defina un conjunto de condiciones de frontera y una condición inicial. La condición inicial especifica la distribución de temperaturas en el sistema, para el inicio del proceso ($t = 0$), y las condiciones de frontera especificarán la temperatura y/o el flujo de calor en el límite entre el producto y el medio, ya sea calentamiento o enfriamiento.

2.2.4.1 Condición de primera clase. En general para materiales homogéneos se asume que la temperatura no varía con la posición esto es:

$$T_s = T_m \quad \text{para } t > 0 \quad (2.7)$$

2.2.4.2 Condición de segunda clase. Fija el flujo de calor en la superficie, siendo en términos rigurosos definido en función del tiempo y la posición, pero se asume que el flujo de calor es igual en cualquier punto superficial cuando el material es homogéneo.

$$q = -kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (2.8)$$

2.2.4.3 Condición de tercera clase. Indica esencialmente que la transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura y el calor es retirado en forma convectiva por el medio:

$$h(T_m - T_s) = - \left(k_{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (2.9)$$

Las tres condiciones de frontera mencionadas anteriormente cubren la mayoría de los casos prácticos del proceso de escaldado-enfriado siendo todas condiciones límites lineales.

2.2.5 Parámetros de la velocidad de transferencia de calor. La velocidad con que ocurre el fenómeno de transferencia de calor por conducción está determinada por las características físicas del producto, así como por las propiedades del medio circundante.

Las propiedades termofísicas determinan la velocidad de transferencia de calor en el interior del producto (SINGH, 1982; SINGH y HELDMAN, 1993).

Debe considerarse la velocidad a la que fluye el fluido que rodea el producto la que determinará el valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor así como el tipo de flujo y, por lo tanto, la velocidad a la que ocurra la transferencia de calor convectiva en la superficie del producto (GEANKOPLIS, 1986).

2.2.5.1 Propiedades termofísicas de los alimentos. Para resolver el problema de la transferencia de calor es necesario conocer las propiedades termofísicas de los alimentos

que definen apropiadamente el comportamiento térmico del alimento durante el escaldado y enfriado.

Propiedades tales como la conductividad térmica, calor específico, y densidad, juegan un papel importante en el diseño y análisis de los procesos de alimentos y de los equipos de procesamiento. En situaciones de transferencia de calor en estado transiente, la temperatura cambia con el tiempo y las propiedades antes mencionadas también (SINGH y HELDMAN, 1993). Debe considerarse que en el estudio de la transferencia de calor en estado transiente es de interés conocer el valor de las propiedades termofísicas, y en la simulación de los fenómenos de transporte, transferencia de calor, los modelos propuestos han llegado a ser muy útiles.

Todas las propiedades termofísicas del producto están calculadas por medio de correlaciones empíricas propuesta por CHOI y OKOS (1986). En literatura existen numerosas correlaciones pero se seleccionó las expresiones de CHOI y OKOS (1986) debido a que calcula las propiedades termofísicas basándose en la composición proximal y la temperatura de evaluación, y además porque abarca una concentración de sólidos desde 0 a 95%, finalmente, el error reportado de estas correlaciones para la predicción de propiedades es de 3,9 a 4,7%.

Estas correlaciones están basadas en valores determinados en forma experimental para los componentes de la leche evaporada y jugo de frutas. Los mismos autores mencionaron que pueden ser aplicados también a otros alimentos.

2.2.5.1.1 Conductividad térmica. La conductividad térmica de un producto no es constante y depende de la temperatura (CUADRO 2). Hay una estrecha relación entre el contenido de agua y esta propiedad, excepto para aquellos productos vegetales considerablemente menos denso que el agua (SWEAT, 1974). Sin embargo, cuando el rango de temperatura es limitado, esta dependencia puede ser despreciada, y en la teoría matemática ordinaria se asume que la conductividad no varía con la temperatura (CARSLAW y JAEGER, 1959).

La conductividad térmica de alimentos con un alto contenido de humedad tiene valores cercanos al de la conductividad térmica del agua (SINGH y HELDMAN, 1993).

CUADRO 2. Correlaciones de CHOI y OKOS (1986) para determinar conductividad térmica (k), densidad (ρ), calor específico (Cp) y difusividad térmica (α).

<i>Propiedad</i>	<i>Forma del modelo</i>	<i>Componente</i>	<i>Modelo</i>
k	$\Sigma(X_i^W k_i)$	Proteína M. Grasa Carbohidratos Fibra Minerales Agua	$1,7881 \times 10^{-1} + 1,1958 \times 10^{-3} T - 2,7178 \times 10^{-6} T^2$ $1,8071 \times 10^{-1} - 2,7604 \times 10^{-3} T - 1,7749 \times 10^{-7} T^2$ $2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2$ $1,8331 \times 10^{-1} + 1,2497 \times 10^{-3} T - 3,1683 \times 10^{-6} T^2$ $3,2962 \times 10^{-1} + 1,4011 \times 10^{-3} T - 2,9069 \times 10^{-6} T^2$ $5,7109 \times 10^{-1} + 1,7625 \times 10^{-3} T - 6,703 \times 10^{-6} T^2$
ρ	$1/\Sigma(X_i^W / \rho_i)$	Proteína M. Grasa Carbohidratos Fibra Minerales Agua	$1,3299 \times 10^3 - 5,1840 \times 10^{-1} T$ $9,2559 \times 10^2 - 4,1757 \times 10^{-1} T$ $1,5991 \times 10^3 - 3,1046 \times 10^{-1} T$ $1,3115 \times 10^3 - 3,6589 \times 10^{-1} T$ $2,4238 \times 10^3 - 2,8063 \times 10^{-1} T$ $9,9718 \times 10^2 + 3,1439 \times 10^{-3} - 3,7574 \times 10^{-3} T^2$
Cp	$\Sigma(X_i^W C_{p_i})$	Proteína M. Grasa Carbohidratos Fibra Minerales Agua	$2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3} T - 1,3129 \times 10^{-6} T^2$ $1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3} T - 4,8008 \times 10^{-6} T^2$ $1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} T - 5,9399 \times 10^{-6} T^2$ $1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3} T - 4,6509 \times 10^{-6} T^2$ $1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3} T - 3,6817 \times 10^{-6} T^2$ $4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5} T + 5,4731 \times 10^{-6} T^2$
α	$\Sigma(X_i^W \alpha_i)$	Proteína M. Grasa Carbohidratos Fibra Minerales Agua	$6,8714 \times 10^{-2} + 4,7578 \times 10^{-4} T - 1,4646 \times 10^{-6} T^2$ $9,8777 \times 10^{-2} - 1,2569 \times 10^{-4} T - 3,8286 \times 10^{-6} T^2$ $8,00842 \times 10^{-2} + 5,3052 \times 10^{-4} T - 2,3218 \times 10^{-6} T^2$ $7,3976 \times 10^{-2} + 5,1902 \times 10^{-4} T - 2,2202 \times 10^{-6} T^2$ $2,2461 \times 10^{-2} + 3,7321 \times 10^{-4} T - 1,2244 \times 10^{-6} T^2$ $1,3168 \times 10^{-1} + 6,2477 \times 10^{-4} T - 2,4022 \times 10^{-6} T^2$

FUENTE: CHOI y OKOS (1986)

2.2.5.1.2 Calor específico. El calor específico depende de la composición del alimento, su contenido de humedad, temperatura y presión. Sin embargo, en muchas aplicaciones de procesamiento de alimentos, normalmente se considera que esta propiedad permanece constante en el intervalo de temperatura de trabajo (SINGH y HELDMAN, 1993). En el proceso de calentamiento y enfriamiento transiente sin cambio de fase, el calor

especifico de un material establece la capacidad de absorber o remover calor, según sea calentamiento o enfriamiento, respectivamente (SCHNEIDER, 1957).

2.2.5.1.3 Densidad. Aunque esta no es una propiedad térmica, la literatura comúnmente la incorpora dada su necesidad para el cálculo de la difusividad térmica como se verá posteriormente.

En muchos problemas de ingeniería se asume que los productos son incompresibles, sin embargo, la densidad del agua y otros productos cambia con la temperatura. En la mayoría de los casos la densidad del alimento decrece con el aumento de la temperatura (LEWIS, 1990).

La densidad de un sólido es definida como la masa de las partículas dividida por su volumen (SINGH y HELDMAN, 1993).

2.2.5.1.4 Difusividad térmica. Esta propiedad puede ser expresada en término de las tres anteriores según la siguiente ecuación (SINGH, 1982):

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.10)$$

donde se asume que las tres propiedades son constantes, lo que es válido en el caso de productos de composición homogénea; de lo contrario estos parámetros pueden ser funciones de la posición (MYERS, 1971). El denominador representa la capacidad de absorber calor y el numerador representa la capacidad de conducir calor.

La difusividad térmica del alimento, como una medición de la cantidad de calor absorbido por un material para un cambio dado de temperatura, indica la habilidad del material para conducir el calor a moléculas adyacentes (DICKERSON y READ, 1968; ÖZISIK, 1977).

La difusividad térmica esta afectada por el contenido de agua y la temperatura así como por la composición. Ya que en muchos procesos, el contenido de agua puede cambiar considerablemente se puede esperar una variabilidad en el valor numérico de

esta propiedad. Además, muchos productos no son homogéneos y la difusividad térmica puede variar de un lugar a otro en el mismo producto (SINGH, 1982).

2.2.5.2 Coeficiente convectivo de transferencia de calor. Es el factor proporcional que representa la resistencia a la transferencia de calor, entre el fluido de calentamiento o enfriamiento y la superficie de un producto inmerso en él. En los tratamientos térmicos como el escaldado o el hidrogenfriado, este coeficiente h es uno de los parámetros más importantes a conocer para el calculo de la cinética de calentamiento o enfriamiento de alimentos, ya que controla la razón de intercambio de calor entre el medio y el producto (ORDOÑEZ, 1996). En consecuencia, es necesario determinarlo y conocerlo para satisfacer la ecuación que rige el proceso de convección.

Algunos valores aproximados del coeficiente h se muestran en el CUADRO 3 donde se aprecia que con convección forzada se obtienen mayores valores de este coeficiente comparados con los de convección natural; y, por ende, con la convección forzada se obtiene una mayor razón de transferencia de calor (SINGH y HELDMAN, 1993).

La mayoría de los modelos que permiten determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor, para el caso particular de convección natural, se pueden generalizar de la siguiente manera:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2.11)$$

Las ecuaciones para la convección forzada presentan la siguiente forma general:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.12)$$

Uno de los métodos más utilizados para determinar coeficiente convectivo de transferencia de calor en forma experimental es el denominado Método de la Capacidad Calorífica Global (“Lumped Capacitance Analysis”), que se basa en la siguiente ecuación:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-\frac{hAt}{C_{pp}V}} \quad (2.13)$$

que sostiene que el calor transferido del medio al sólido, debe ser igual a la variación de energía del sólido. Cuando el Número de Biot (N_{Bi}), que representa la razón entre la resistencia interna y la resistencia externa a la transferencia de calor (hL/k) es menor a 0,1 indica que la resistencia a la conducción dentro del sólido es despreciable comparada con la resistencia a la convección a través de la capa límite del fluido.

Muchos investigadores como LIMA y SASTRY (1990), BALASUBRAMANIAN y SASTRY (1994), ORDOÑEZ (1996), entre otros, han empleado este método utilizando objetos metálicos para satisfacer el bajo requerimiento de N_{Bi} . Debido a la alta conductividad térmica que presentan los metales, estos cumplen largamente el requisito de N_{Bi} menor que 0,1.

CUADRO 3. Valores aproximados del coeficiente convectivo de transferencia de calor.

<i>Fluido</i>	<i>Coficiente convectivo de transferencia de calor (W/m²K)</i>
Aire	
Convección natural	5 – 25
Convección forzada	10 – 200
Agua	
Convección natural	20 – 100
Convección forzada	50 - 10.000
Agua en ebullición	3.000 - 100.000
Condensación de vapor de agua	5.000 - 100.000

FUENTE: SINGH y HELDMAN (1993)

2.3 Predicción de tiempos y perfiles de temperatura por métodos numéricos

En la literatura existen numerosos métodos de predicción de tiempos de calentamiento y enfriamiento por separado, pero prácticamente no existen métodos que involucren las dos etapas como proceso global. Tales métodos se pueden dividir en dos grandes grupos: a) los métodos numéricos, basados en la solución numérica mediante la técnica de diferencias finitas y elementos finitos de las ecuaciones diferenciales ordinarias de transferencia de calor y, b) los métodos fórmula, métodos de predicción de

tiempos de congelación por medio de formulas simples, basados en la teoría de conducción de calor en estado semi-estable o bien en relaciones empíricas o semi-empíricas. Los métodos numéricos poseen una mayor exactitud y versatilidad que los métodos fórmula, pero usualmente requieren de tecnología computacional apropiada que no siempre se encuentra disponible en las industrias de alimentos. Así los métodos fórmula se presentan como los más sencillos y fáciles de operar.

En general los métodos numéricos pueden ser diseñados para incorporar la variación de una serie de parámetros tales como: propiedades térmicas, cambio de fase en un rango de temperaturas, variedad de condiciones de frontera y geometrías regulares e irregulares.

Dentro de los métodos numéricos existen dos grandes grupos para solucionar el problema de transferencia de calor, los métodos de diferencia finitas y los métodos de elementos finitos. Estas soluciones no están sujetas a restricciones de ecuaciones analíticas (GAFFNEY *et al.*, 1985).

Para los experimentos en los cuales el material tiene una forma regular y es homogéneo el método de elementos finitos no tiene ventajas sobre el de diferencias finitas (CLELAND y EARLE, 1984).

Los esquemas más comunes de diferencia finitas son tres: explícito, implícito y Crank-Nicholson, todos ellos referidos a un esquema de dos tiempos. También ha sido aplicado el esquema implícito de tres tiempos sugerido por LEES (1966), aunque CLELAND (1990), ha incluido también el método de transformación de entalpía.

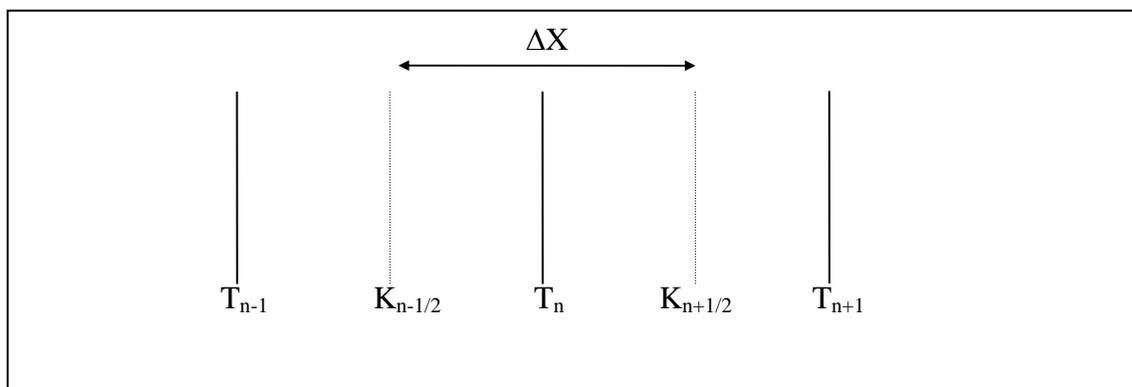


FIGURA 1. Elemento diferencial de una plancha.

La FIGURA 1 presenta una ilustración esquemática para un pequeño elemento diferencial en una plancha infinita.

Un balance de energía sobre el elemento de volumen de la plancha está dado por:

$$\left(MC_p \frac{\partial T}{\partial t} \right)_n = \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{n+1/2} - \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{n-1/2} \quad (2.14)$$

La solución a esta ecuación puede estar dada por cualquiera de los esquemas que se presentan en el CUADRO 4 (CLELAND y EARLE, 1984).

WADSWORTH y SPADARO (1969) desarrollaron un modelo analítico considerando el problema de conducción de calor transiente que permite determinar la distribución de temperaturas en el interior de camotes, los que se consideraron de geometría aproximadamente esférica, al final del tiempo de calentamiento. LUND *et al.* (1972) desarrollaron un modelo analítico en forma de series, para el procesamiento térmico transiente de paralelepípedos de zanahoria, tomando en cuenta la desactivación térmica de la peroxidasa en el producto como parámetro para determinar la efectividad del escaldado asumiendo que la desactivación térmica sigue una cinética de reacción de primer orden y que la constante exhibe dependencia de la temperatura de acuerdo a la ecuación de Arrhenius.

CALIFANO (1981) desarrolló un modelo numérico de diferencias finitas, utilizando el esquema implícito de Crank-Nicholson para modelar el proceso de escaldado de papas. Chau *et al.*, citado por GAFFNEY *et al.* (1985) desarrollaron un modelo en diferencias finitas para la transferencia de calor transiente en un producto de geometría esférica sujeto a temperatura del medio variable con el tiempo y con generación de calor por respiración, evaporación de humedad en la superficie, y flujo de calor por radiación entre el producto y el medio.

ZHANG y CAVALIERI (1991), desarrollaron un modelo numérico de diferencias finitas uni y bidimensional para describir la distribución de temperaturas durante el calentamiento con vapor de judías verdes, demostrando que el modelo de conducción de calor unidimensional predijo adecuadamente la cinética en el interior de estas.

CUADRO 4. Esquema de diferencias finitas comúnmente utilizados para la modelación del proceso de calentamiento y enfriamiento unidireccional de productos vegetales. Caso: plancha infinita.

<p>Esquema de Lees:</p> $(\rho C_p)_n^i \frac{T_n^{i+1} - T_n^{i-1}}{2\Delta t} = \frac{1}{3(\Delta x)^2} \left\{ k_{n+1/2}^i \left[(T_{n+1}^{i+1} - T_n^{i+1}) + (T_{n+1}^i - T_n^i) + (T_{n+1}^{i-1} - T_n^{i-1}) \right] - k_{n-1/2}^i \left[(T_n^{i+1} + T_{n-1}^{i+1}) + (T_n^i - T_{n-1}^i) + (T_n^{i-1} - T_{n-1}^{i-1}) \right] \right\}$
<p>Esquema modificado de Crank-Nicholson:</p> $(\rho C_p)_n^i \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \left\{ k_{n+1/2}^i \left[(T_{n+1}^{i+1} - T_n^{i+1}) + (T_{n+1}^i - T_n^i) \right] - k_{n-1/2}^i \left[(T_n^{i+1} - T_{n-1}^{i+1}) + (T_n^i - T_{n-1}^i) \right] \right\}$
<p>Esquema completamente implícito:</p> $(\rho C_p)_n^i \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{(\Delta x)^2} \left[k_{n+1/2}^i (T_{n+1}^i - T_n^i) - k_{n-1/2}^i (T_n^i - T_{n-1}^i) \right]$
<p>Esquema completamente explícito:</p> $(\rho C_p)_n^i \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{(\Delta x)^2} \left[k_{n+1/2}^i (T_{n+1}^i - T_n^i) - k_{n-1/2}^i (T_n^i - T_{n-1}^{i+1}) \right]$
<p>Esquema explícito transformación de entalpía:</p> $\frac{H_n^{i+1} - H_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \left[k_{n+1/2}^i (T_{n+1}^i - T_n^i) - k_{n-1/2}^i (T_n^i - T_{n-1}^i) \right]$

FUENTE: CLELAND y EARLE (1984).

Numerosas soluciones a los problemas de transferencia de calor en frutas y vegetales han sido desarrolladas por diversos autores, los que han realizado diversas simplificaciones adecuando las diferentes soluciones a cada situación particular, no hay una única solución ni tampoco existe una solución mejor que otra para todas las situaciones disponibles en la práctica (AGUILERA, 1996).

2.4 Generalidades del Brócoli

2.4.1 Centro de origen y difusión. La zona noreste del Mediterráneo (desde Grecia hasta Siria) sería el centro de origen más probable de esta hortaliza. A pesar de ser conocida y consumida en época de los romanos, recién se ha generalizado su cultivo en diversas áreas del mundo presentando una gran tasa de expansión y un incremento notable de su producción en las últimas décadas. En Estados Unidos, las primeras descripciones de brócoli datan de inicios del siglo XIX; hoy en día es el principal país productor y consumidor. En Asia, a pesar de ser un cultivo también reciente, hay producción en diferentes países, destacando Japón, donde se ha realizado un significativo mejoramiento genético de esta variedad botánica (KRARUP y MOREIRA, 1998).

2.4.2 Características botánicas y órgano de consumo. Planta cultivada anualmente, pertenece a la familia de las crucíferas cuyo nombre científico es *Brassica oleracea* L. variedad itálica forma cymosa. Está formada por una cabeza central y brotes laterales rodeado por botones florales. Puede ser consumida en su totalidad, lo cual incluye tallos, cabeza central y botones laterales (Krarup citado por MONTEFUSCO, 1997). Es un cultivo de clima templado frío, para su óptimo desarrollo requiere temperaturas alrededor de los 8°C a 17 °C como ideal, aunque puede soportar de 2°C a 25°C y un fotoperíodo de 11 a 13 horas luz, clima templado a ligeramente frío y humedad relativa intermedia a baja (KRARUP y MOREIRA, 1998).

2.4.3 Composición y usos. El brócoli ha sido calificado como la hortaliza de mayor valor nutritivo por unidad de peso de producto comestible. Su aporte de vitaminas, principalmente C, B₂ (riboflavina) y provitamina A, es elevado; además suministra cantidades significativas de minerales como Ca, K y especialmente P (KRARUP y MOREIRA, 1998). Además, presenta un bajo contenido de carbohidratos (BRAVO y ALDUNATE, 1986). Adicionalmente, en el último tiempo se han determinado una serie de compuestos que tendrían efectos benéficos en la prevención del cáncer y diversas

enfermedades, razón que justifica el creciente interés en su consumo y cultivo, tanto como producto fresco como congelado, e incluso como deshidratado (KRARUP y MOREIRA, 1998).

2.4.4 Almacenamiento. Las hortalizas recién cosechadas se deben enfriar rápidamente hasta cerca de 0°C, ya que el calor las destruye y favorece el desarrollo de microorganismos. El brócoli se conserva dos días en lugar fresco y ventilado y 14 días a 0°C y a una humedad relativa de 95% (Delgado *et al.*, citado por LAY 1993).

El deterioro post-cosecha se debe a la pérdida continua de agua por transpiración y respiración lo que conduce a una marchitez y pérdida de espesor, lo cual se traduce en pérdida de peso (GRUDA y POSTOLSKI, 1986).

2.4.5 Importancia del cultivo en Chile. El cultivo comercial de brócoli se inició recién a principios de 1980, pero ha tenido un crecimiento rápido por su orientación a la agroindustria de congelados y su aceptación en el mercado interno. En la actualidad se debe considerar una hortaliza de importancia intermedia, ya que se cultivan poco menos de 1.000 ha por año, concentradas en las regiones Metropolitana, VII y VI (KRARUP y MOREIRA, 1998).

2.4.6 Tipos o estilos de brócoli congelado. Según el UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USDA (1980), los siguientes son por norma los tipos o estilos de corte en brócoli congelado.

- “Spears”. Son inflorescencias o porciones adjuntas al tallo con o sin hojas anexas que pueden variar en largo de 9 a 15 cm. El tallo o “spear” puede ser cortado longitudinalmente.
- “Florets”. Son inflorescencias o porciones adjuntas al tallo con o sin hojas anexas que pueden variar en un largo de 2,5 a 9 cm. Cada uno de los floretes debe pesar más de 6 g. Los floretes pueden cortarse longitudinalmente.

- “Cut”. Son tallos cortos o cortados en porciones que pueden variar en un largo de 2 a 5 cm. El material de la inflorescencia debe ser a lo menos 62,5 g por cada 250 g (25%) y las hojas no deben sobrepasar 62,5 g sobre 250 g de muestra.

- “Chopped”. Son tallos cortos o cortados en porciones que no tengan menos de 2 cm de largo. El material de la inflorescencia debe tener al menos 12,5 g en 50 g de producto y las hojas no deben sobrepasar 12,5 g en 50 g del producto (25%).

- “Pieces or random cut pieces”. Son todos los tallos que no cumplen con los requerimientos del estilo “Cut” o “Chopped”.

3 MATERIAL Y METODO

3.1 Lugar de ejecución

El desarrollo experimental se realizó en el Laboratorio de Procesamiento de Alimentos del Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL) de la Universidad Austral de Chile (UACH).

3.2 Materiales y equipos

3.2.1 Material biológico. Brócoli (*Brassica oleracea* L. variedad itálica). Esta hortaliza fue la base para el desarrollo experimental del presente trabajo. Los brócolis se obtuvieron de proveedores de la zona.

3.2.2 Equipo de hidrocalentamiento. Es un sistema por lotes (“batch”) con recirculación para asegurar una temperatura homogénea del medio de calentamiento antes de que el producto sea procesado.

El sistema completo, componentes y características, se describen a continuación:

- Sistema generador de calor conformado por resistencias de 220 Volts y 2000 Watts dispuestas en la parte inferior del equipo.
- Termostato digital marca SONDER, modelo EC55, 220 Volts 50/60 Hz., con sonda de temperatura tipo PTC precisión $\pm 2\%$, necesario para mantener la temperatura de trabajo.

3.2.3 Equipo de hidrogenfriamiento. Es un sistema por lotes (“batch”) con recirculación de agua para mantener homogénea la temperatura del medio de enfriamiento dentro del sistema antes de introducir el producto.

Sus componentes y características se detallan a continuación:

- El equipo de enfriamiento dispone de un sistema de frío de 220 Volts, brazo de enfriamiento móvil tipo serpentín que se sumerge en el agua para lograr la temperatura deseada.
- Bomba de recirculación de 220 Volts, 500 Watts, 50 - 60 Hz.

3.2.4 Sistema de adquisición de datos de temperaturas. Para cada experiencia se registró la temperatura del producto y del medio, a intervalos regulares de cuatro segundos, en un registrador de doce canales Digi-sense, las que pueden ser visualizadas simultáneamente en una computadora. Para observar y guardar los datos en archivos, se requirió del programa PC-DAC12, propio del equipo Digi-sense.

La exactitud del sistema de adquisición de datos de temperatura es de $\pm 0,1$ % de lectura.

3.2.5 Termocuplas. Para registrar las temperaturas del producto se utilizaron termocuplas tipo T (cobre-constantan) flexibles marca Pyromation, calibre 30 con revestimiento de teflón.

3.2.6 Otros. Se requirió además de accesorios y equipos complementarios, tales como:

- Pie de metro digital Fowler & NSK.
- Cuchillo.
- Aguja quirúrgica.
- Cinta adhesiva
- Colador metálico.
- Cables de extensión para termocuplas tipo T (cobre-constantan), calibre 20, con aislamiento de PVC/PVC.
- Cronómetro digital CASIO.
- Termómetros de precisión ASTNA.
- Computadora EPSON PC / XT modelo 80 c 85.
- Estufa a $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ Gallen Kamp H-150, Inglaterra
- Balanza analítica digital CHYO JK-200, Japón.

- Cápsulas de aluminio.
- Desecador con sílica.
- Pinza metálica.
- Alginato de gelificación regular JELTRATE.
- Yeso de color blanco ISODENT.
- Yeso de color amarillo ISODENT.
- Vaselina sólida.
- Vaselina líquida.

En la FIGURA 2 se puede observar el esquema completo incluyendo el sistema de adquisición de datos.

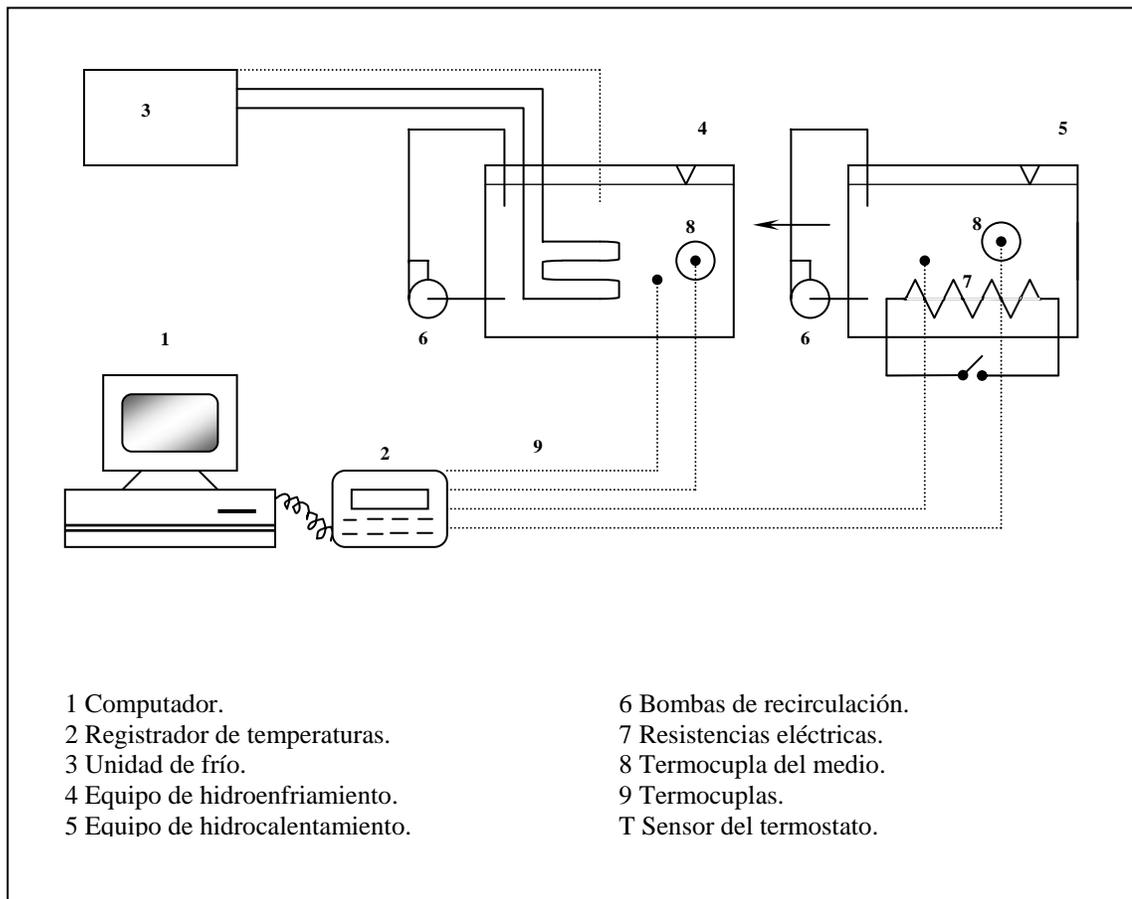


FIGURA 2. Sistema de escaldado e hidrogenfriado y de adquisición de datos de temperatura.

3.3 Métodos

3.3.1 Calibración de termocuplas. La calibración de las termocuplas se realizó con un termómetro de referencia o patrón. Con este fin, primeramente se procedió a sumergirlas por separado en dos medios a temperatura constante, uno a 0°C logrado con agua destilada más hielo, y el otro sólo con agua destilada en ebullición (100°C). Los puntos fijos citados fueron verificados con un termómetro patrón. En el momento que el termómetro patrón marca la temperatura de los puntos fijos se procede a observar la lectura correspondiente a la termocupla, ajustándolo luego mediante la opción “setup” del registrador si fuese necesario. NICHOLAS y WHITE (1994) recomiendan este método para verificar la calibración de todo tipo de termocuplas, en conjunto con el equipo registrador de temperaturas. El procedimiento de calibración se realizó previo a cada ensayo experimental.

Además de comprobar la calibración del sistema se examinaron posibles cortes y problemas de soldadura en los alambres que componen las termocuplas. También al momento de capturar datos se verificó que no existiera ningún tipo de interferencia magnética cerca del lugar de trabajo que pudiese alterar los registros de temperatura.

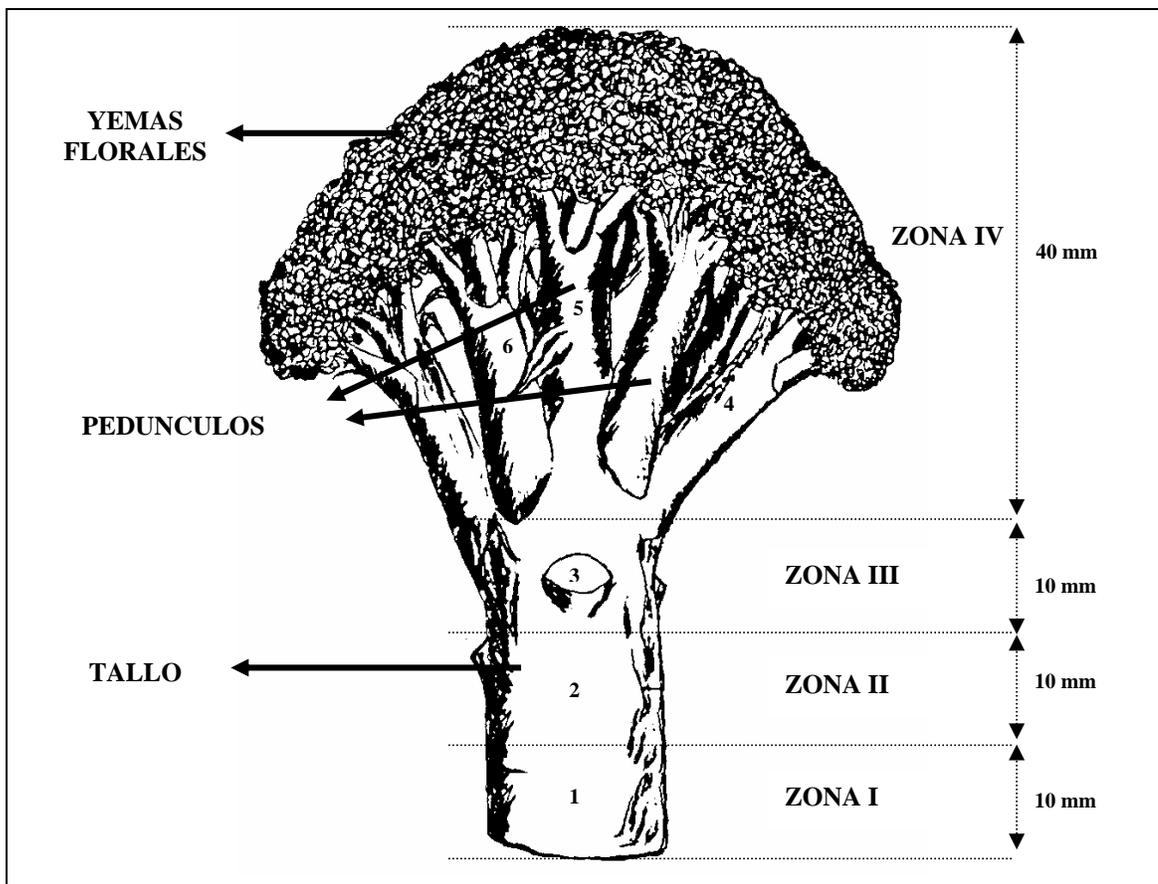
3.3.2 Inserción de termocuplas. Previo a la inserción de termocuplas se insertó primero una aguja quirúrgica fina en el punto determinado del tallo y/o pedúnculos, de manera que esta perforación sirva de guía a la termocupla. La inserción de las termocuplas se realizó siempre de manera perpendicular a la parte o dimensión más ancha del tallo y/o pedúnculos (FIGURA 3). Además para mayor seguridad el cable de la termocupla se fijó al florete con una cinta adhesiva resistente a la humedad.

Transcurrido el tratamiento térmico las muestras debieron seccionarse longitudinalmente, para verificar que las termocuplas estuvieran efectivamente en la posición preestablecida.



FIGURA 3. Inserción de termocuplas.

3.3.3 Determinación experimental del punto de más lento calentamiento/enfriamiento. Para esta experiencia se utilizaron floretes de 70 mm de longitud, el cual fue seccionado en cuatro zonas de trabajo (FIGURA 4).



1-2-3-4-5-6 Representan los puntos de inserción de las termocuplas

FIGURA 4. Estructura, distribución de zonas y ubicación de termocuplas en florete de brócoli de 70 mm.

Como se muestra en la FIGURA 4, se ubicaron tres zonas en el tallo del florete (zona I, zona II y zona III) y una zona se ubicó sobre el tallo del florete subdividiéndose a su vez en tres secciones (sección IV-a, sección IV-b, sección IV-c). Los parámetros experimentales se observan en el CUADRO 5.

CUADRO 5. Parámetros experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de 70 mm.

<i>Zonas</i>	<i>Longitud del florete (mm)</i>	<i>Temperaturas del medio (°C)</i>		<i>Tiempo de tratamiento (min.)</i>	
		<i>Escaldado</i>	<i>Hidrogenfriado</i>	<i>Escaldado</i>	<i>Hidrogenfriado</i>
I, II, III, IV	70	95	2	5	5
I, II, III	70	95, 85, 75	2	1, 3, 5, 10	5

3.3.4 Obtención de perfiles de temperatura experimentales del punto de más lento calentamiento/enfriamiento. Por disponibilidad de tamaño de brócoli en esta etapa se utilizaron floretes de 50 mm. La ubicación de la termocupla se determinó aplicando la regla de proporciones en relación a la longitud del tallo, respecto al punto de más lento calentamiento/enfriamiento obtenido en los floretes de 70 mm de la sección anterior (3.3.3). Los parámetros experimentales se observan en el CUADRO 6.

CUADRO 6. Parámetros experimentales para la obtención de perfiles de temperatura durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de 50 mm.

<i>Longitud del florete (mm)</i>	<i>Temperaturas del medio (°C)</i>		<i>Tiempo de tratamiento (min.)</i>	
	<i>Escaldado</i>	<i>Hidrogenfriado</i>	<i>Escaldado</i>	<i>Hidrogenfriado</i>
50	95, 85, 75, 65	2	1, 3, 5, 10	5

3.3.5 Modelo de conducción de calor en diferencias finitas. De acuerdo a las consideraciones teóricas el modelo más realista, físicamente hablando, para representar el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en alimentos de formas cilíndricas es aquel que considera un proceso de conducción de calor transiente y variación de las propiedades térmicas con la temperatura. Esta última situación le da la característica de no linealidad al problema de transferencia de calor por lo que no pueden emplearse los métodos analíticos para solucionar la ecuación diferencial parcial que gobierna el fenómeno físico citado.

La selección y subsiguiente solución numérica del modelo matemático a formular requerirá de las siguientes suposiciones:

- La transferencia de calor ocurre sólo por conducción en el interior del producto, predominando en dirección radial.
- Las condiciones del medio permanecen invariables, estableciendo condiciones límites convectivas constantes en la superficie del producto.
- El producto está compuesto de agua y sólidos. El alimento es considerado isotrópico y de composición uniforme. La composición del producto no varía durante las etapas de calentamiento y enfriamiento.
- Las propiedades termofísicas (K , C_p y ρ) del producto son variables con la temperatura. La magnitud de la variación está en directa relación a la variación de las propiedades del componente agua con la temperatura.
- Las propiedades termofísicas: calor específico (C_{p_s}), conductividad térmica (K_s) y densidad (ρ_s) de los sólidos del producto son constantes con respecto a la temperatura.
- No hay contradifusión del agua y la pérdida de sólidos solubles es despreciable.

El modelo completo desarrollado por MORALES-BLANCAS (1997) en el marco del proyecto FONDECYT 1970303, se sustenta en las siguientes ecuaciones:

$$C(T) \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[rK(T) \frac{dT}{dr} \right] \quad ; 0 < r < D/2, t > 0 \quad (3.3)$$

$$T = T_{in} \quad ; 0 \leq r \leq D/2, t = 0 \quad (3.4.1)$$

ó

$$T = f(r) \quad ; 0 \leq r \leq D/2, t = t_H \quad (3.4.2)$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \quad ; r = 0, t > 0 \quad (3.5)$$

$$K(T) \frac{dT}{dr} = h(T_a - T_{SUP}) \quad ; r = 0, t > 0 \quad (3.6)$$

La ecuación (3.3) representa la ecuación de gobierno que describe la distribución de temperatura, en coordenadas cilíndricas, en el producto para cualquier tiempo diferente de cero. La ecuación (3.4.1) establece la condición inicial para la etapa de calentamiento ($t = 0$) e indica una distribución de temperatura uniforme en todo el producto. La Ecuación (3.4.2) establece la condición inicial para la etapa de enfriamiento ($t = t_H$) e indica que la distribución de temperaturas de los puntos interiores es función de la posición y corresponderá a las temperaturas finales de la etapa de calentamiento. La ecuación (3.5) representa la condición de frontera con flujo de calor cero en el centro del objeto; y, la ecuación (3.6) representa la condición de frontera de tercera clase (enfriamiento o calentamiento por convección en la superficie del objeto) la cual es la más comúnmente encontrada en problemas prácticos de escaldado e hidrogenfriado de alimentos.

En la Ecuación (3.3) el calor específico volumétrico es igual al producto del calor específico por la densidad [$C(T) = C_p(T) \cdot \rho(T)$]. Los parámetros dependientes de la temperatura $C_p(T)$, $\rho(T)$ y $K(T)$ son calculados a cualquier temperatura utilizando el criterio de la solución binaria (mezcla de dos componentes físicamente distintas: agua y sólidos) y las propiedades de los componentes (agua y sólidos) de acuerdo a los modelos que se muestran a continuación:

$$\frac{1}{\rho(T)} = \frac{Y_w}{\rho_w(T)} + \frac{Y_s}{\rho_s} \quad (3.7)$$

$$C_p(T) = C_{p_w}(T)Y_w + C_{p_s}Y_s \quad (3.8)$$

$$K(T) = \frac{K_W [K_S M^2 + K_W(1 - M^2)]}{K_S M^2(1 - M) + K_W(1 - M^2 + M^3)} \quad (3.9)$$

donde: $K_W = K_W(T)$ (3.10)

$$M^3 = 1 - \frac{Y_w \rho(T)}{\rho_w(T)} \quad (3.11)$$

La Ecuación (3.9) es para el caso de productos de composición uniforme e isotrópicos y fue desarrollada e implementada por KOPELMAN (1966).

Las propiedades termofísicas del agua en el rango de 0 a 100 °C se expresaron mediante las siguientes relaciones obtenidas de los datos reportados en CRC HANDBOOK (1996):

$$\rho_w(T) = \rho_{w0} + \rho_{w1}T + \rho_{w2}T^2 + \rho_{w3}T^3 \quad (3.12)$$

donde:

$$\rho_{w0} = 0,233172 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{w1} = 6,76474 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \text{ K}$$

$$\rho_{w2} = -1,87743 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3 \text{ K}^2$$

$$\rho_{w3} = 1,56896 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3 \text{ K}^3$$

$$K_w(T) = K_{w0} + K_{w1}T + K_{w2}T^2 + K_{w3}T^3 \quad (3.13)$$

donde:

$$K_{w0} = -4,98411 \times 10^{-1} \text{ W/m K}$$

$$K_{w1} = 517,006 \times 10^{-5} \text{ W/m K}^2$$

$$K_{w2} = -29,1489 \times 10^{-7} \text{ W/m K}^3$$

$$K_{w3} = -6,66278 \times 10^{-9} \text{ W/m K}^4$$

$$Cp_w(T) = Cp_{w0} + Cp_{w1}T + Cp_{w2}T^2 + Cp_{w3}T^3 \quad (3.14)$$

donde: $Cp_{w0} = 106,907 \times 10^2 \text{ J/kg K}$

$$C_{P_{W1}} = -56,5815 \text{ J/kg K}^2$$

$$C_{P_{W2}} = 161,938 \times 10^{-3} \text{ J/kg K}^3$$

$$C_{P_{W3}} = -0,152273 \times 10^{-3} \text{ J/kg K}^4$$

3.3.6 Software para cálculos en Ingeniería de Procesos. Estos corresponden a los programas computacionales que se utilizaron como herramientas de cálculo.

3.3.6.1 Software Foodheatcool v 1.0. Este software se encuentra disponible “on-line” en la siguiente URL: <http://www.wamfoodlab.uach.cl/>. Dentro de sus funciones permite obtener perfiles de temperatura simulados de los procesos de calentamiento y enfriamiento para intervalos regulares de espacio y tiempo utilizando el método numérico de diferencias finitas involucrando cuatro esquemas clásicos (Explícito, Implícito Puro, Crank-Nicholson y Lees) para solucionar el problema de la conducción de calor en alimentos de geometrías regulares 1D del tipo: plancha, cilindro y esfera. Además permite calcular tiempos de procesos en alimentos de geometrías 2D y 3D del tipo: paralelepípedo, cilindro corto y varilla infinita utilizando factores de forma derivados analíticamente.

Los datos necesarios para generar los perfiles de temperatura, ya sean estos en las etapas de calentamiento o enfriamiento son:

- Dimensión del objeto (mm): espesor de plancha, diámetro del cilindro o esfera.
- Propiedades termofísicas del alimento, las que pueden ser ingresadas desde un archivo o desde el teclado: porcentaje de humedad, densidad (kg/m^3), calor específico (J/kg K), conductividad térmica (W/m K). Estas propiedades fueron obtenidas mediante el software “on-line” Foodproperty v 1.0.
- Parámetros del medio: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), y coeficiente convectivo de transferencia de calor ($\text{W/m}^2 \text{K}$).
- Criterio de finalización: Temperatura central ($^{\circ}\text{C}$), temperatura promedio ($^{\circ}\text{C}$), tiempo de proceso (s) y entalpía másica promedio (J/kg) correspondiente a la temperatura final del proceso.

- Producto: Temperatura inicial del producto ($^{\circ}\text{C}$), además se puede escoger la opción de las propiedades variables o constantes con la temperatura.
- Numéricos: número de elementos de volumen ($2 < N < 30$), incremento de tiempo para el cálculo, intervalo de tiempo para las salidas, estos dos últimos en segundos. Además se puede escoger el esquema de diferencias finitas los que pueden ser: Explícito, Implícito, Crank-Nicholson y Lees.

Para poder calcular tiempos de proceso, la información que se debe proporcionar al programa es similar a la detallada anteriormente.

Los datos anteriores, tanto para generar perfiles de temperatura como para calcular tiempos de proceso, poseen un orden lógico de aparición y presentación, los que a su vez se encuentran en un menú desplegable en la parte superior de la pantalla. Así Foodheatcool v 1.0 se transforma en una herramienta cómoda y fácil de utilizar, con la que el usuario tiene total dominio y conocimiento de sus acciones.

Finalmente toda la información generada o ingresada por el programa puede ser almacenada en archivos de respaldo (*.dat) fácilmente recuperables desde alguna planilla electrónica o procesador de texto compatibles con Windows 95 o superior.

Mayor información acerca de lo anterior, así como del método de diferencias finitas utilizadas por el programa se encuentra en ZUÑIGA (2000).

3.3.6.2 Software Foodproperty v 1.0. Este software se encuentra disponible “on-line” en la siguiente URL: <http://www.wamfoodlab.uach.cl/>. Dentro de sus funciones permite calcular las propiedades termofísicas (conductividad térmica, calor específico, densidad). Otra propiedad que puede calcular es la entalpía de alimentos, para cualquier rango de temperaturas entre -40 a 150 $^{\circ}\text{C}$, utilizando los modelos de la fracción composicional y de solución binaria. El primer modelo calcula las propiedades termofísicas para una temperatura específica o rango de temperaturas basándose en la composición química y las correlaciones de CHOI y OKOS (1986). El segundo modelo calcula las propiedades termofísicas para una temperatura específica o rango de temperaturas basándose en el conocimiento del contenido de agua inicial y al modelo de la solución binaria.

3.3.7 Ingeniería Reversa y aplicaciones CAE (Computer-Aided Engineering). La Ingeniería Reversa está referida a la recuperación de la forma y tamaño de modelos físicos mediante la digitalización 3D. Las aplicaciones CAE se refieren a la simulación de procesos de conducción de calor en objetos de formas irregulares complejas sujeto a condiciones de borde convectivas durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado.

3.3.7.1 Digitalización 3D. Mediante el brazo robótico digitalizador MicroScribe-3DL y el software Rhinoceros 3.0 SR3c fue posible capturar los modelos geométricos digitales tridimensionales a partir de réplicas en yeso de floretes de brócoli. Para la obtención de las réplicas en yeso se utilizó la tecnología dental (MORALES-BLANCAS *et al.*, 2002).

Mayor información puede encontrarse en PINO (2004) y en la siguiente URL: <http://www.fooddigicaelab.uach.cl/>.

3.3.7.2 Análisis de Elementos Finitos. Mediante el software ALGOR v 15 es posible, entre otras posibilidades, realizar los análisis de transferencia de calor a modelos geométricos digitales 3D. Este software CAE utiliza el Método de los Elementos Finitos (cuya sigla en inglés es FEM, Finite Element Method), el cual es un método asistido por computador, para calcular perfiles de temperatura durante el calentamiento y enfriamiento en alimentos de formas irregulares complejas. El programa convierte el dominio irregular 3D en un número finito de partes llamadas elementos cuyo comportamiento térmico se especifica con un número finito de parámetros. Dichos elementos contienen una serie de puntos interconectados entre sí llamados nodos y al conjunto se le conoce como malla. El comportamiento de cada pequeño elemento es calculado por conjuntos de ecuaciones matemáticas. Luego el computador suma todos los comportamientos individuales para calcular el comportamiento del dominio completo (MORALES-BLANCAS *et al.*, 2003).

Mayor información puede encontrarse en RODRIGUEZ (2004) y en la siguiente URL: <http://www.fooddigicaelab.uach.cl/>.

3.3.8 Determinación del ajuste de las curvas simuladas por Foodheatcool v 1.0. El ajuste entre las curvas de los perfiles de temperatura experimentales y simulados fue expresado mediante la Raíz Cuadrada del Error Promedio (Root Mean Square Error, RMSE), expresada según la ecuación 3.19:

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_i^N [(T_i - T_i^*) / T_i]^2}{N}} \times 100 \quad (3.19)$$

donde N es el número de temperaturas experimentales, T_i son las temperaturas experimentales y T_i^* son las temperaturas simuladas. El RMSE es definido como la raíz cuadrada del error al cuadrado promedio (MSE) y es también llamado error estándar de estimación (STEEL y TORRIE 1960; BIZOT 1983).

En todos los casos los valores de RMSE (%) para la etapa de escaldado se determinaron hasta el momento que comienza a enfriarse el producto y para la etapa de hidrogenfriado hasta el final del proceso. Además se adoptó como criterio ingenieril un RMSE máximo de 10 % (CALIFANO, 1981; CLELAND y EARLE, 1984; ZHANG y CAVALIERI, 1991; MORALES-BLANCAS *et al.*, 1999).

Los perfiles de temperatura simulados fueron obtenidos considerando las propiedades del alimento variables con la temperatura, así se mejoraron sustancialmente los resultados simulados en comparación con aquellos obtenidos considerando las propiedades constantes con la temperatura, debido esencialmente a la importancia del contenido de agua y la variación de sus propiedades con la temperatura (ZUÑIGA, 2000).

4 PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Determinación experimental del punto de más lento calentamiento/enfriamiento

En la FIGURA 5 se pueden apreciar los perfiles de temperatura de las cuatro zonas identificadas durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenado en floretes de brócoli de 70 mm.

Al realizar una comparación se puede observar que los perfiles que describen un calentamiento/enfriamiento más lento, durante el escaldado/hidrogenado, son aquellos generados por las zonas que se encuentran localizadas en el tallo del florete (zonas I, II y III), incluso es posible advertir que el perfil de temperatura de la zona III describe un mayor retardo en la cinética. Se deja en evidencia que los perfiles generados para la zona IV describen un rápido calentamiento/enfriamiento, llegando a equilibrarse con la temperatura del medio transcurrido sólo algunos segundos del inicio del proceso de escaldado/hidrogenado.

Este resultado, ciertamente esperado, se debe a que el tamaño de los pedúnculos de la zona IV poseen un calibre (diámetro) muy inferior al que presenta el tallo del florete. Entonces, en la zona IV se verifica una mayor velocidad de transferencia de calor debido a la mayor área específica (m^2/kg).

De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible entonces descartar la zona IV como posible punto de más lento calentamiento/enfriamiento y continuar el curso de la investigación con las zonas localizadas en el tallo del florete.

Las FIGURAS 6, 7 y 8 muestran los perfiles de temperatura de las tres zonas localizadas en el tallo del florete durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenado en floretes de brócoli de 70 mm.

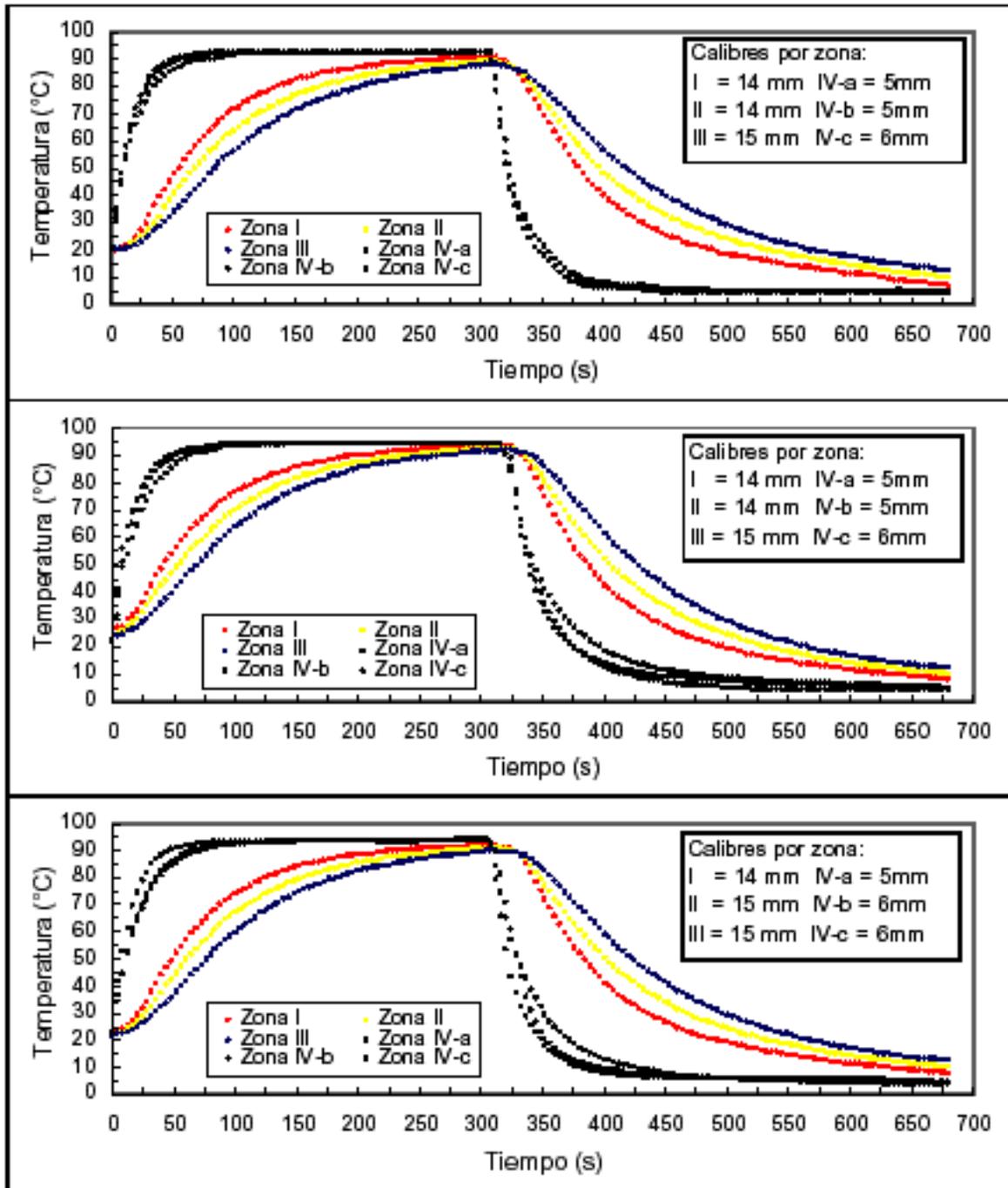


FIGURA 5. Perfiles de temperatura experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado (95 °C) - hidrogenfriado (2 °C) en floretes de brócoli de 70 mm.

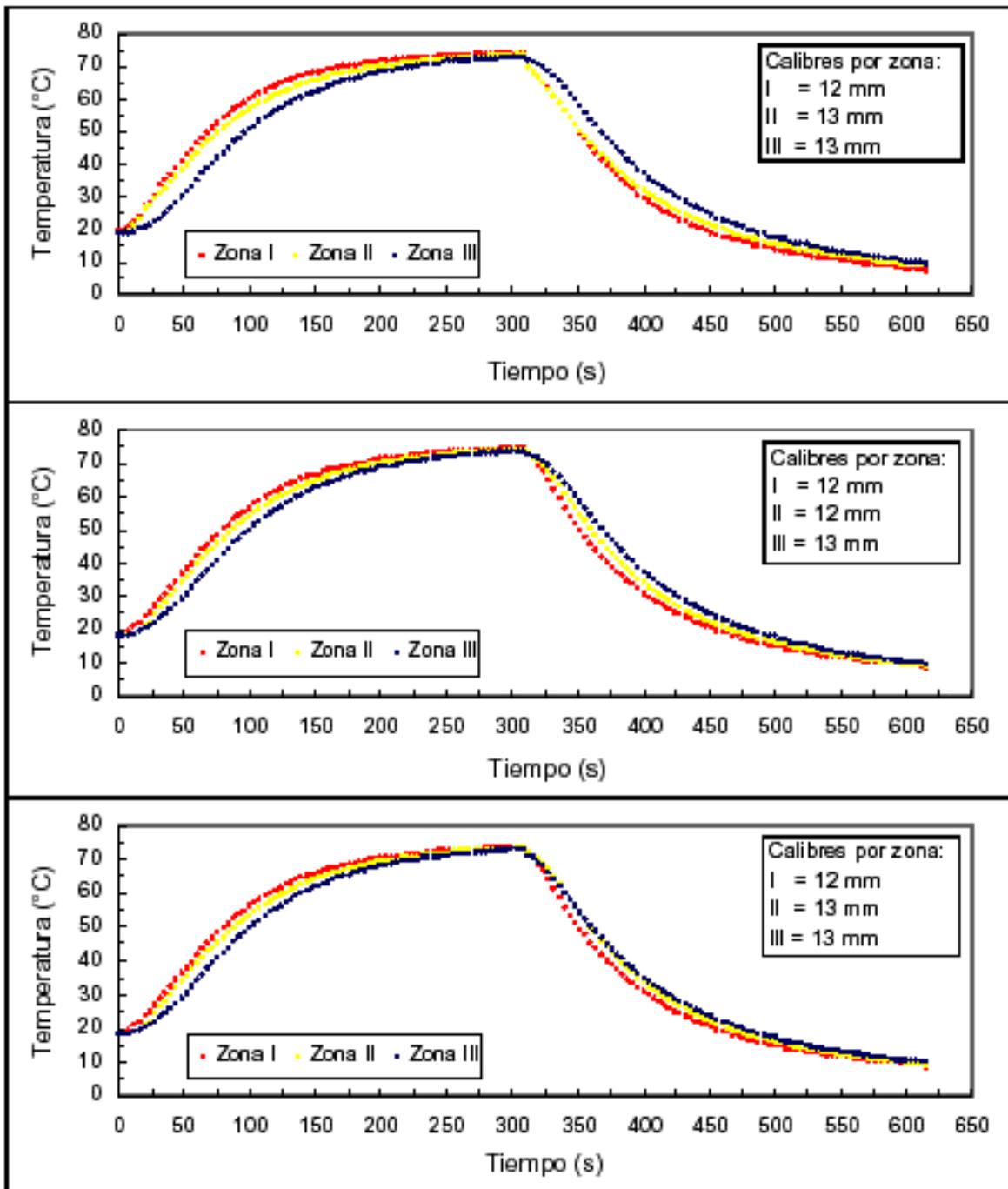


FIGURA 6. Perfiles de temperatura experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado (75 °C) - hidrogenfriado (2 °C) en tallo de floretes de brócoli de 70 mm.

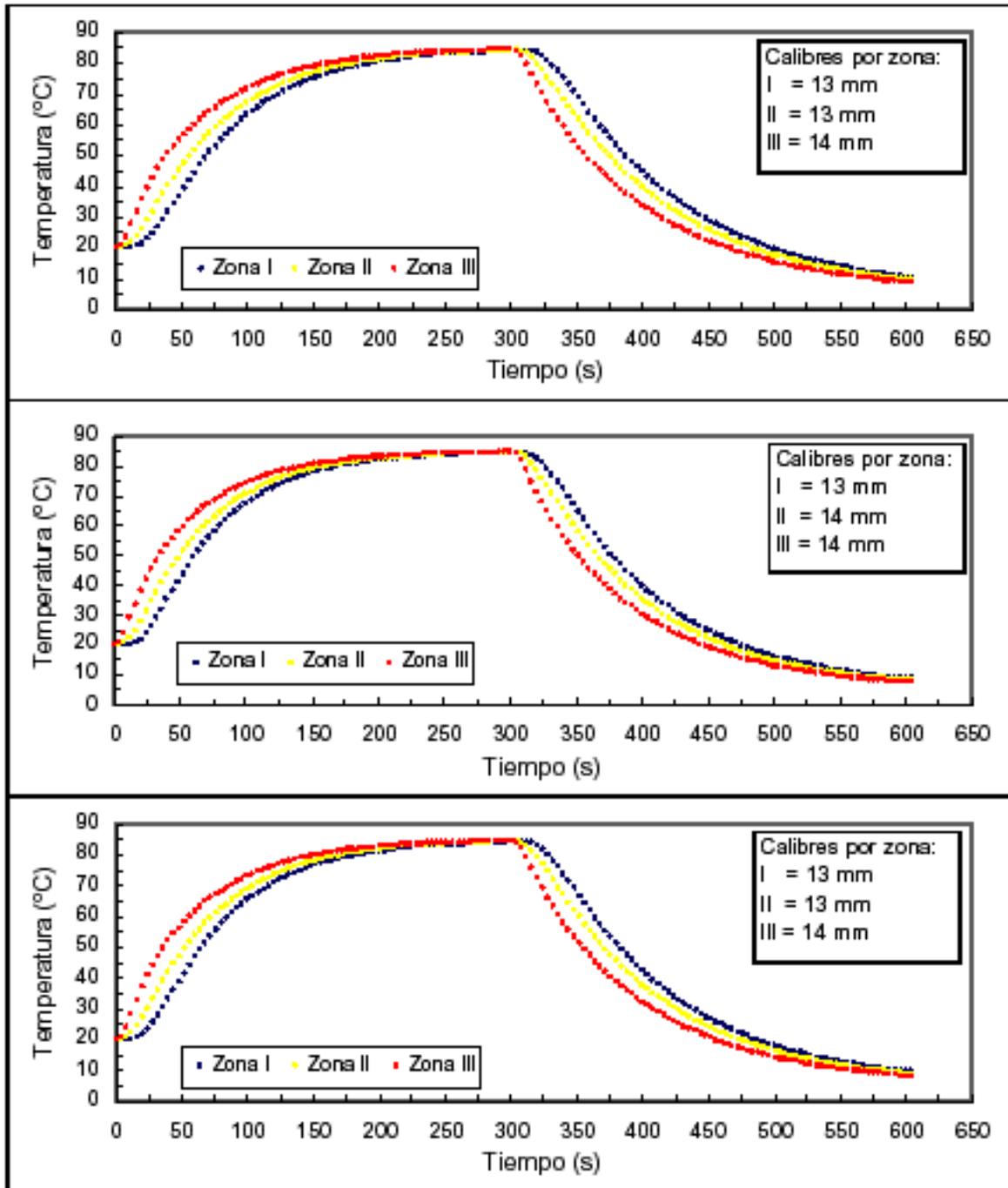


FIGURA 7. Perfiles de temperatura experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado (85 °C) - hidrogenfriado (2 °C) en tallo de floretes de brócoli de 70 mm.

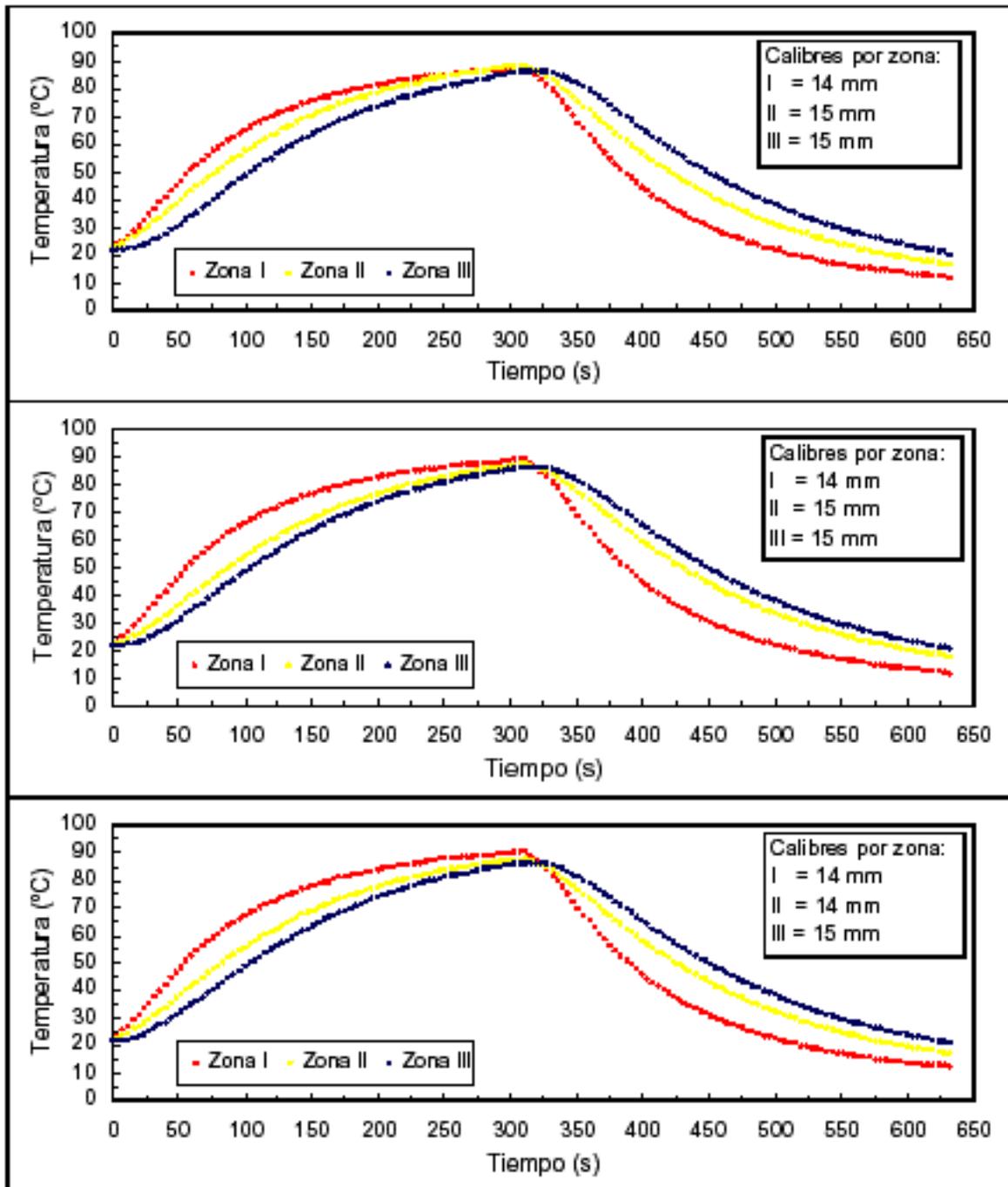


FIGURA 8. Perfiles de temperatura experimentales para la determinación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado (95 °C) - hidrogenfriado (2 °C) en tallo de floretes de brócoli de 70 mm.

Al realizar una comparación entre los diferentes perfiles, se puede observar que el punto localizado en la zona III describe un calentamiento/enfriamiento más lento durante el escaldado/hidrogenfriado, respecto a los puntos localizados en las zonas I y II.

De esta manera en base a los resultados mostrados se puede decir que en la zona III se encuentra el punto de más lento calentamiento/enfriamiento, y que éste se encuentra ubicado a 25 mm medidos axialmente desde la base del florete, lo que corresponde aproximadamente a una distancia de $5/6$ de la longitud total del tallo (30 mm). En la siguiente sección se encuentran mayores detalles acerca de la cinética de penetración de calor.

4.2 Verificación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento

Fue necesario verificar que el punto de más lento calentamiento/enfriamiento haya sido determinado adecuadamente en forma experimental para los floretes de 70 mm, y a la vez comprobar la validez de aplicar la regla de proporciones para determinar el punto de más lento calentamiento/enfriamiento en los floretes de 50 mm que involucran una longitud de tallo de 10 mm.

Debido a la consistencia y percibibilidad del brócoli, la primera etapa para la simulación computacional de los procesos de conducción de calor en geometrías irregulares complejas, consistió en la confección de réplicas en yeso a partir de floretes de brócoli de 70 y 50 mm (FIGURA 9).



FIGURA 9. Réplica en yeso de un florete de brócoli de 50 mm.

En la segunda etapa se procedió a obtener los modelos geométricos digitales 3D capturados de los modelos físicos en yeso (FIGURA 10), de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.3.7.1.



FIGURA 10. Modelo geométrico 3D de un florete de brócoli de 50 mm.

Posteriormente en la tercera etapa se realizó la simulación de escaldado e hidrogenfriado (FIGURAS 11 y 12) para condiciones de asimetría geométrica, de acuerdo al procedimiento de la sección 3.3.7.2.

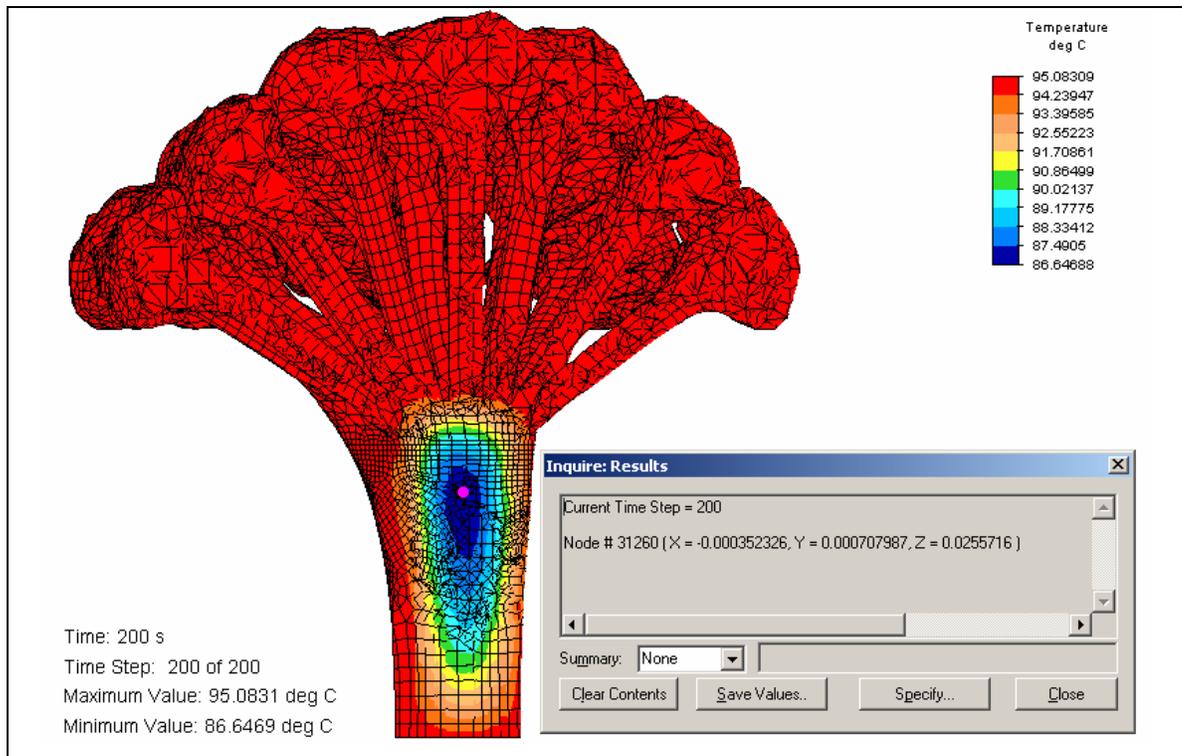


FIGURA 11. Penetración de calor en florete de brócoli de 70 mm.

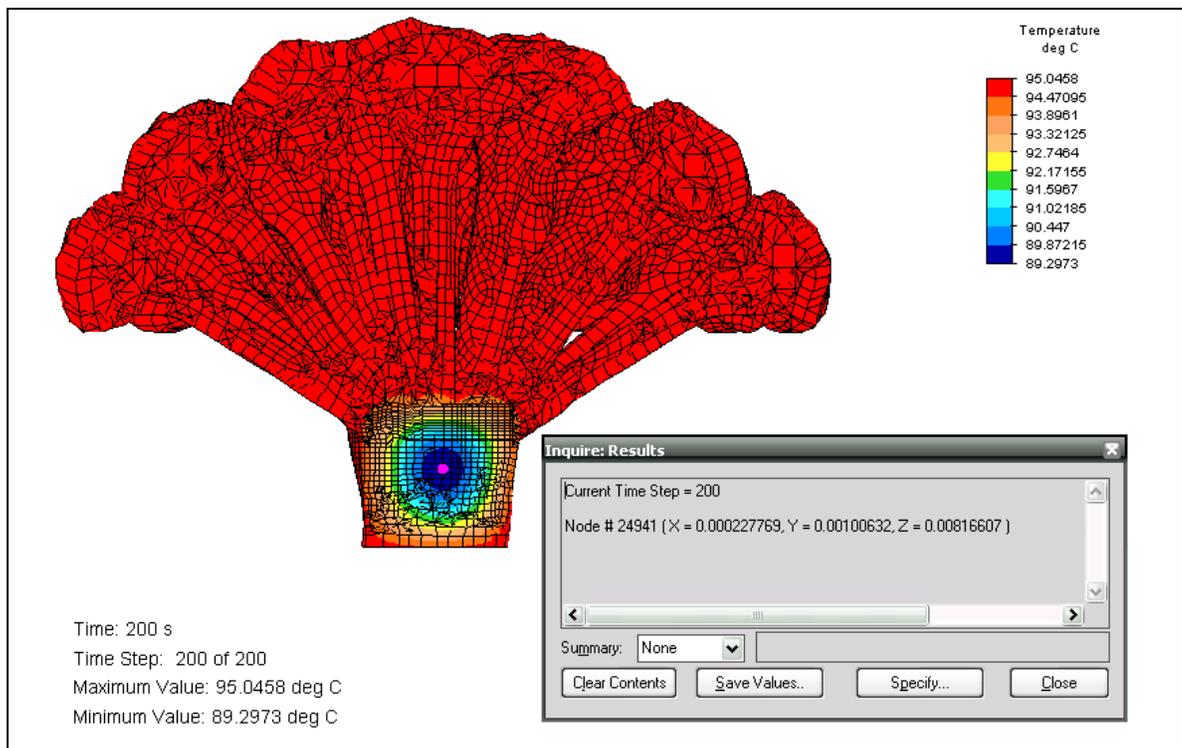


FIGURA 12. Penetración de calor en florete de brócoli de 50 mm.

En las FIGURAS 11 y 12 puede observarse la penetración de calor y las diferentes temperaturas que se presentaron desde la superficie hasta el interior de los floretes de 70 y 50 mm. La zona azul es la que presenta el menor rango de temperaturas, y contiene el punto de más lento calentamiento/enfriamiento destacado en color rosado. La posición exacta de este punto está señalada por la coordenada z en el recuadro del extremo inferior derecho de cada figura. Así, para floretes de 70 mm con una longitud de tallo de 30 mm, la coordenada z es 25,5 mm (FIGURA 11) y para floretes de 50 mm con una longitud de tallo de 10 mm es 8,2 mm (FIGURA 12).

Al observar la distribución de temperaturas en el dominio irregular complejo (FIGURAS 11 y 12), es posible observar el efecto que tiene el conjunto pedúnculos-yemas florales sobre la cinética de penetración de calor. Lo anterior se refleja en la ubicación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento la cual no coincide con el centro geométrico del tallo. Estos resultados indicarían que la conducción de calor en dirección radial predomina sobre la axial en el tallo del florete de brócoli.

Este resultado nos permite verificar que la posición del punto de más lento calentamiento/enfriamiento se encuentra localizado aproximadamente a una distancia de 5/6 de la longitud total del tallo medido axialmente desde la base del florete donde el diámetro es mayor. Lo anterior comprueba los resultados encontrados en la sección 4.1, así como la validez de aplicar la regla de proporciones a los floretes de 50 mm.

4.3 Forma irregular compleja versus cilindro infinito

En base a los resultados de la sección 4.2 es posible considerar que la velocidad de penetración de calor en el punto de más lento calentamiento/enfriamiento de un florete de brócoli es equivalente a la de un cilindro infinito. Sin embargo, en esta sección se verificará esta suposición comparando el perfil de temperaturas generado con ALGOR para una geometría irregular compleja (florete de brócoli) con el simulado con Foodheatcool para un cilindro infinito.

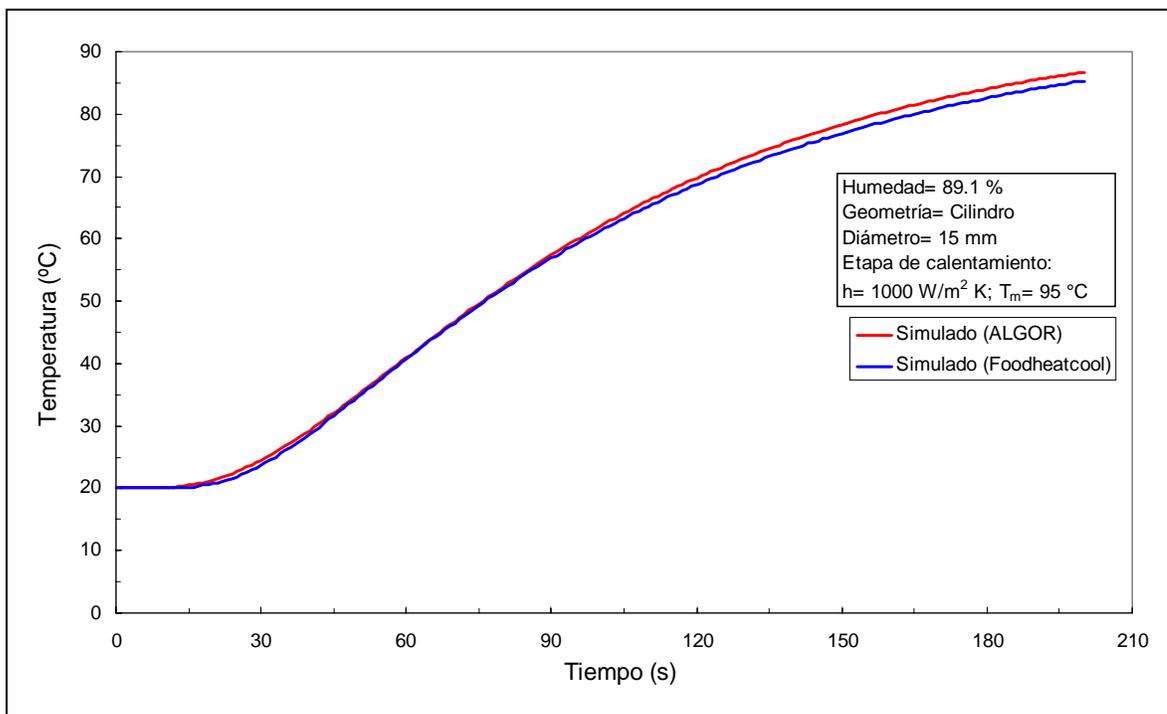


FIGURA 13. Perfiles de temperatura simulados por Foodheatcool v 1.0 y ALGOR v 15 durante el proceso de escaldado (95 °C) en tallo de floretes de brócoli de 50 mm.

Al analizar la FIGURA 13 se puede advertir que ambos perfiles muestran similares comportamientos. El valor de RMSE (%), tomando como referencia el perfil simulado por ALGOR, correspondió a un 2,2 %. Esto permitiría establecer que no existen diferencias apreciables entre ambos perfiles.

Por lo tanto, de acuerdo a este resultado, puede considerarse verdadera la hipótesis de suponer que la velocidad de penetración de calor en el punto de más lento calentamiento/enfriamiento de un florete de brócoli es equivalente a la de un cilindro infinito del mismo calibre para simular el proceso de conducción de calor. El diámetro representativo para la simulación en 1D debe corresponder al punto de más lento calentamiento/enfriamiento y debe medirse axialmente a 5/6 de la longitud del tallo desde la base del florete.

4.4 Obtención de perfiles de temperatura experimentales y simulados

4.4.1 Influencia de la composición. Desde que ensayos preliminares indicaron una diferencia importante entre la humedad de las yemas florales y el tallo del florete de brócoli se procedió primeramente a determinar el contenido de humedad para cada una de las zonas. Los resultados de humedad pueden observarse en el CUADRO 8. Luego, con las humedades obtenidas se recalcularon los valores de los componentes sólidos ponderándolos de acuerdo a la proporción correspondiente a la composición del brócoli entero encontrado en la literatura especializada (WATT y MERRIT, 1975). En el CUADRO 8 también pueden observarse los valores recalculados correspondientes a la composición de los sólidos por zonas en el florete de brócoli y la del brócoli entero de la fuente de referencia.

Al analizar estas composiciones podemos advertir que la única que presenta una pequeña variación con respecto a las demás es la composición de las yemas florales, siendo su humedad inferior a las demás composiciones.

Para evaluar el impacto que podría significar esta diferencia, se presentan en el CUADRO 8 los valores correspondientes a las propiedades termofísicas del brócoli, en función a las distintas composiciones presentadas en el CUADRO 7.

CUADRO 7. Composición del brócoli.

<i>Zona</i>	<i>Composición (%)</i>					
	<i>Humedad</i>	<i>Carbohidratos</i>	<i>Proteínas</i>	<i>Lípidos</i>	<i>Cenizas</i>	<i>Fibra</i>
I ¹	92,5	3,0	2,5	0,2	0,8	1,0
II. ¹	92,5	3,0	2,5	0,2	0,8	1,0
III ¹	92,2	3,1	2,6	0,2	0,8	1,1
IV (pedúnculos) ¹	90,7	3,7	3,1	0,3	0,9	1,3
IV (yemas florales) ¹	85,6	5,8	4,8	0,4	1,4	2,0
Entero ²	89,1	4,4	3,6	0,3	1,1	1,5

¹ Recalculada basándose en la proporción de sólidos del brócoli entero², como composición de referencia.

² WATT y MERRIT (1975).

CUADRO 8. Propiedades termofísicas estimadas del brócoli a 20 °C.

<i>Zona</i>	ρ (<i>kg/m³</i>)	<i>k</i> (<i>W/m K</i>)	<i>Cp</i> (<i>J/kg K</i>)
I	1022	0,584	3993,6
II	1022	0,584	3993,6
III	1022,9	0,583	3986,5
IV(pedúnculos)	1027,5	0,578	3950,5
IV(yemas florales)	1045,3	0,564	3826,1
Entero	1033,4	0,574	3910,9

Al analizar la FIGURA 14 se puede advertir que todos los perfiles se superponen entre sí, siendo imposible distinguir claramente un perfil de otro. Esto estaría indicando que no existen diferencias entre los perfiles de temperatura simulados debido a que los valores estimados para las propiedades termofísicas de cada una de las zonas evaluadas no presentan mayores diferencias.

En el CUADRO 9 se reportan los RMSE (%) obtenidos de los perfiles de temperatura simulados de la FIGURA 14. Para el cálculo de RMSE (%) se tomó como referencia el perfil simulado en función a la composición del brócoli entero que reporta la literatura.

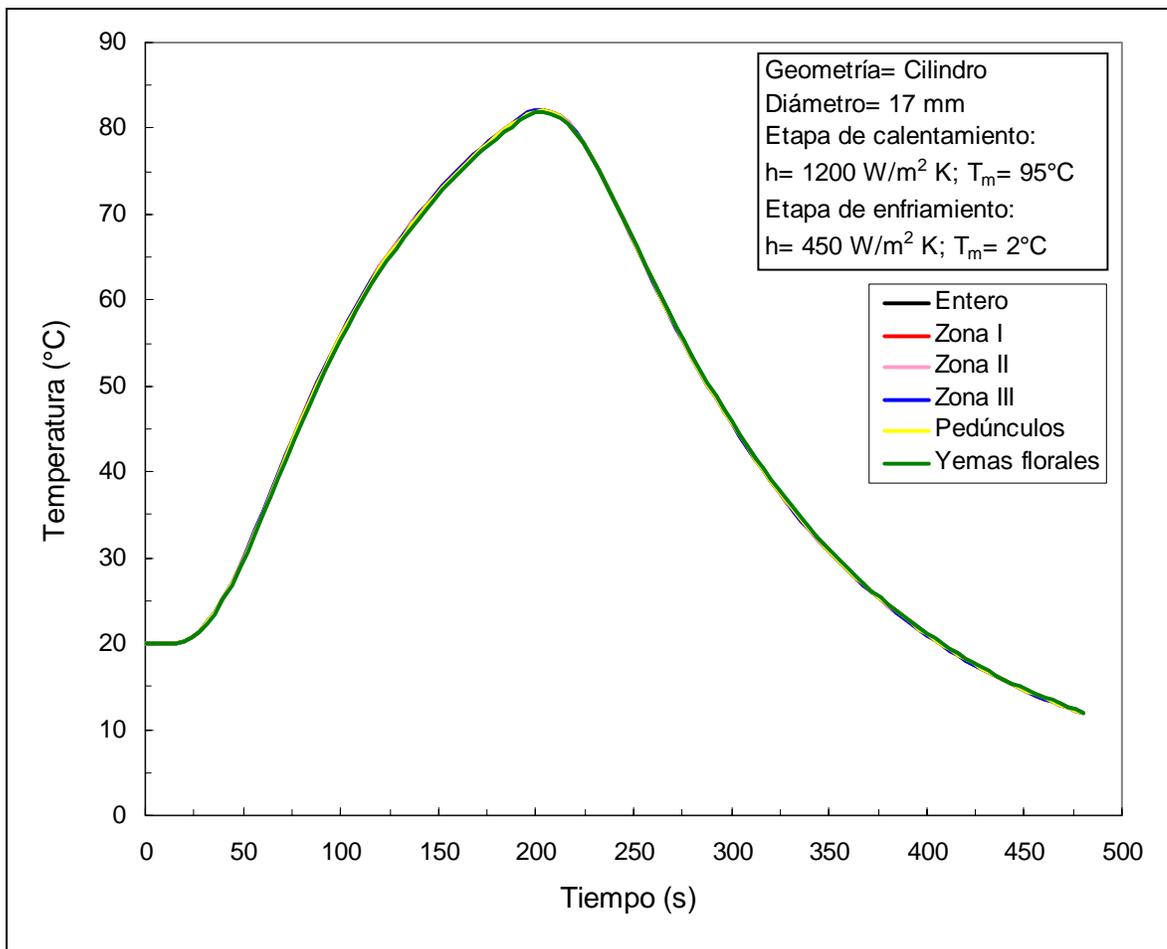


FIGURA 14. Perfiles de temperatura simulados durante el proceso combinado de escaldado (95 °C) - hidrogenfriado (2 °C) para distintas composiciones de brócoli.

Los valores de RMSE (%) y desviación estándar, reportados en el CUADRO 10, son bajos. Esto permitiría inferir que no existen diferencias importantes entre los perfiles de temperatura simulados para las distintas composiciones de cada zona.

En conclusión se puede afirmar que las diferencias de humedad que presentan las yemas florales respecto a las determinadas en las distintas zonas del florete y a la humedad del brócoli entero, reportada en la literatura, no influyen de manera importante en la estimación de las propiedades termofísicas del alimento, y por lo tanto no afectarían en forma apreciable la velocidad de transferencia de calor.

CUADRO 9. Raíz cuadrada del error promedio de los perfiles simulados durante el proceso combinado de escaldado (95°C) - hidrogenfriado (2°C) para distintas composiciones de brócoli.

<i>Zonas</i>	<i>RMSE (%)</i>	
	<i>Escaldado</i>	<i>Hidrogenfriado</i>
Zona I	0,39	0,43
Zona II	0,39	0,43
Zona III	0,35	0,38
Zona IV (pedúnculos)	0,14	0,19
Zona IV (yemas florales)	0,40	0,40
PROMEDIO	0,34	0,36
D.S.	0,11	0,10

4.4.2 Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados. En las FIGURAS 15, 16, 17 y 18, se pueden apreciar algunos de los perfiles de temperatura experimentales y simulados con Foodheatcool v 1.0 durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de brócoli de 50 mm, respecto al punto de más lento calentamiento/enfriamiento. El "lag" característico que se observa al comienzo del proceso entrega evidencia de la correcta ubicación de las termocuplas en las diferentes repeticiones. Comparando los perfiles de temperatura para los gráficos reportados se puede apreciar la superposición entre las curvas experimentales y simuladas para una misma condición de tratamiento térmico.

La bondad del ajuste entre los perfiles experimentales y simulados para todas las experiencias, descritas en el CUADRO 6, fueron expresados en RMSE (%) y se encuentran reportados en detalle en el ANEXO 1. En el CUADRO 10 se presenta un resumen de los valores de RMSE (%) para las etapas de escaldado e hidrogenfriado.

De los resultados obtenidos en el CUADRO 10, puede establecerse que no existen diferencias entre los perfiles de temperatura experimentales y simulados. Esto gracias al buen ajuste obtenido, presentando valores de 1,8 % RMSE promedio para la etapa de escaldado y 5,1 % RMSE promedio para la etapa de hidrogenfriado. Además, como es posible observar en el ANEXO 1, todos los valores de RMSE (%) se

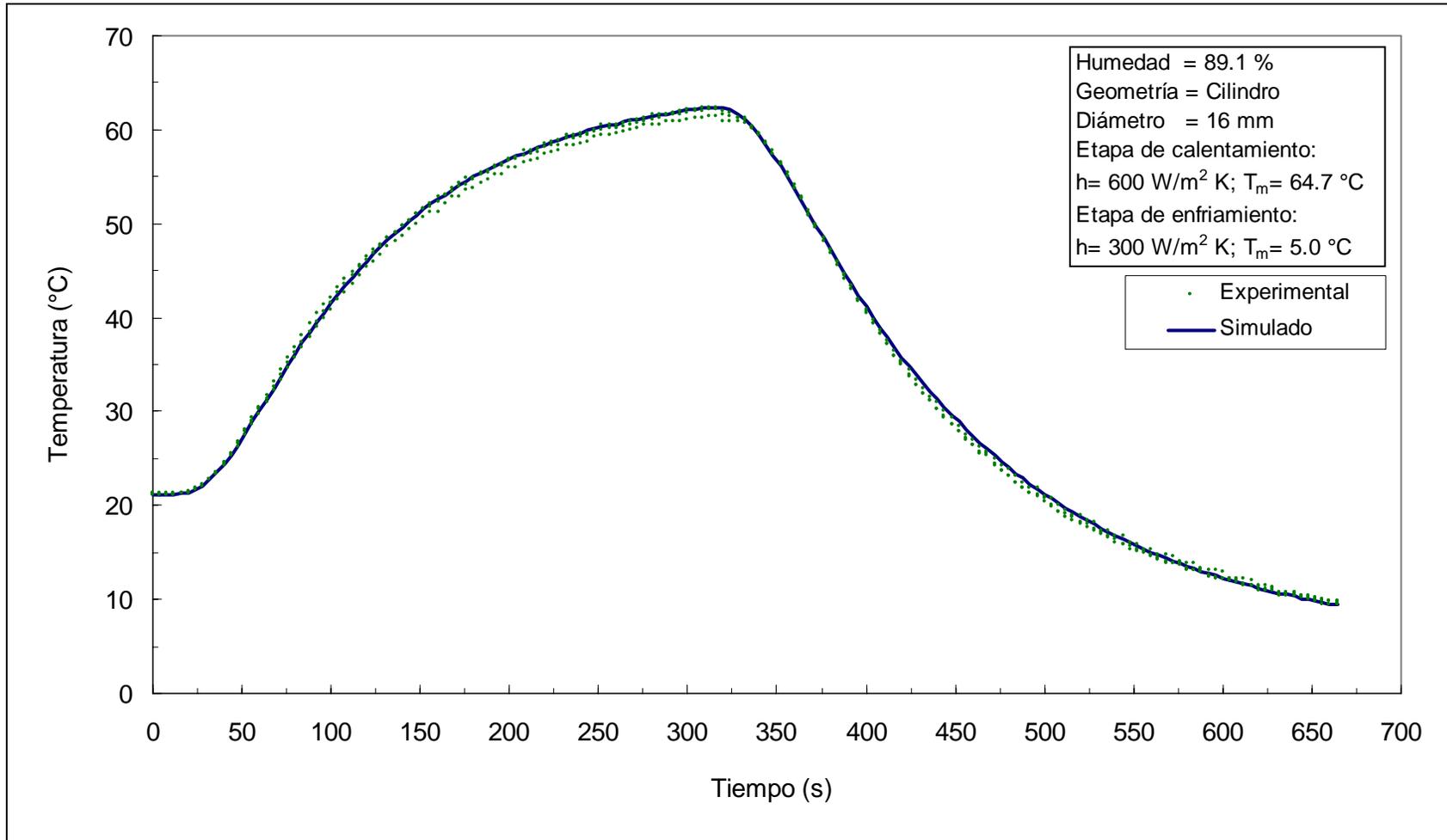


FIGURA 15. Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso combinado de escaldado ($65 \text{ }^\circ\text{C}$) - hidrogenfriado ($2 \text{ }^\circ\text{C}$) en floretes de brócoli de 50 mm, resultado de tres repeticiones.

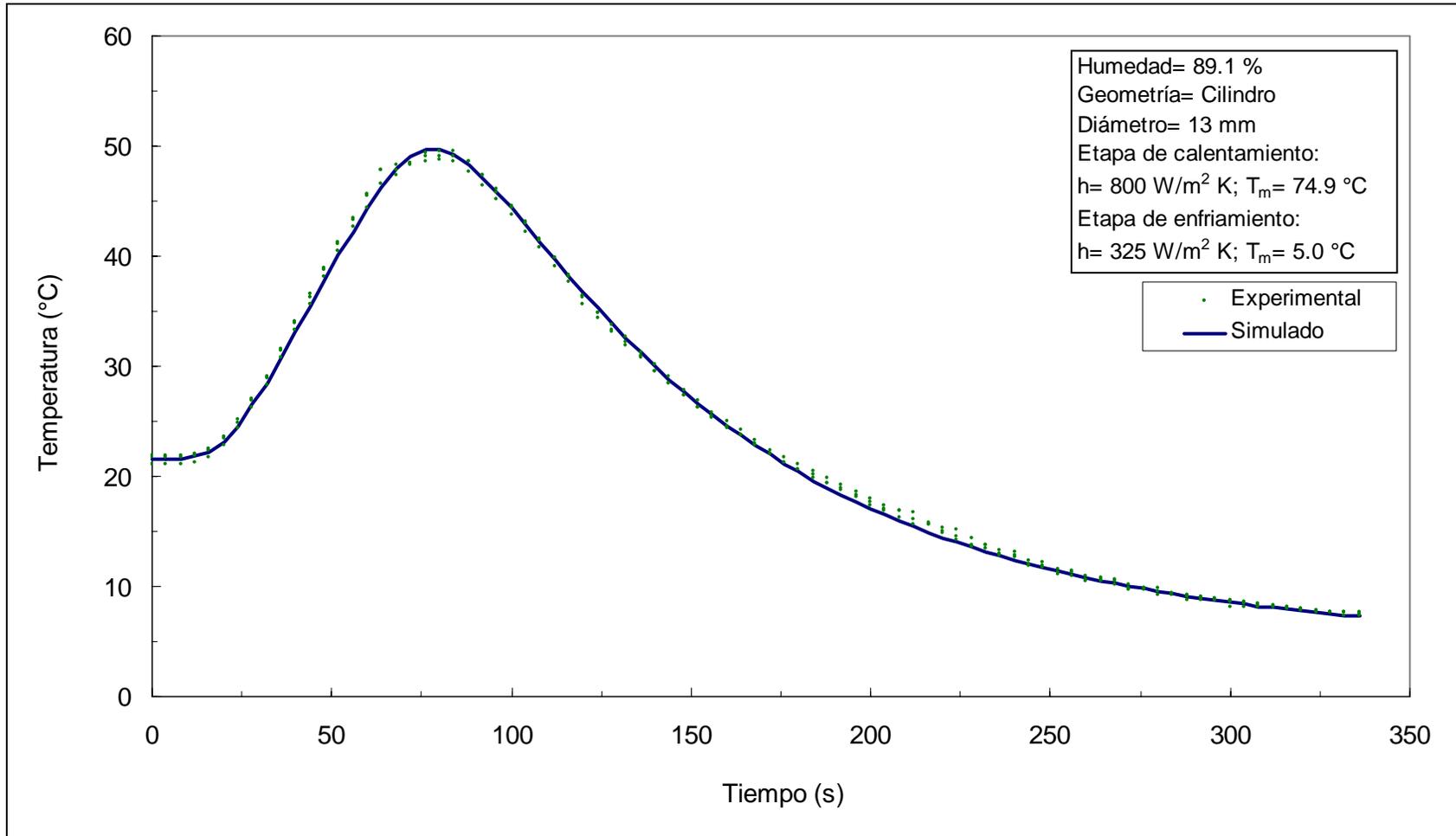


FIGURA 16. Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso combinado de escaldado ($75 \text{ }^\circ\text{C}$) - hidrogenfriado ($2 \text{ }^\circ\text{C}$) en floretes de brócoli de 50 mm, resultado de tres repeticiones.

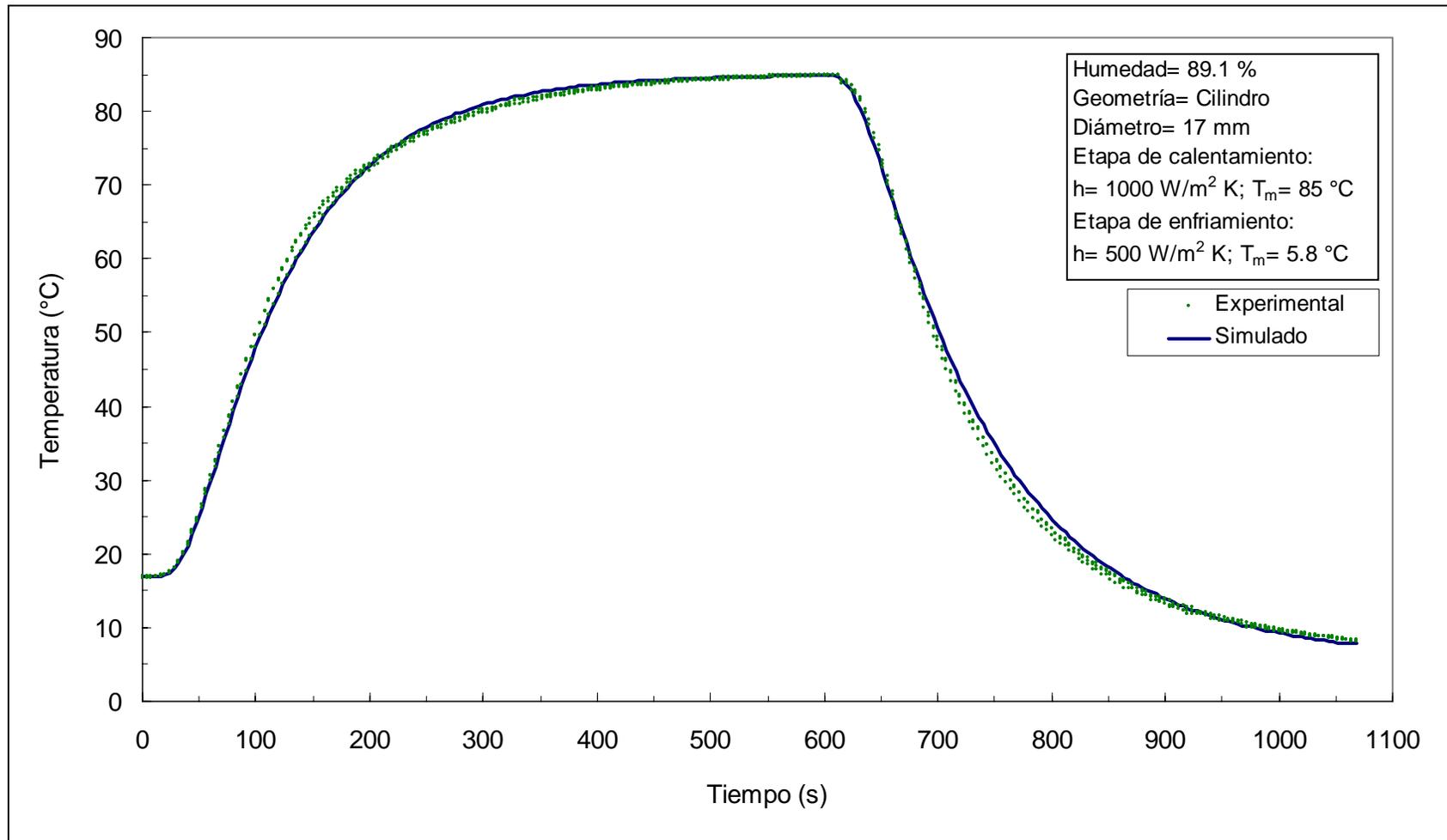


FIGURA 17. Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso combinado de escaldado ($85 \text{ }^\circ\text{C}$) - hidrogenfriado ($2 \text{ }^\circ\text{C}$) en floretes de brócoli de 50 mm, resultado de tres repeticiones.

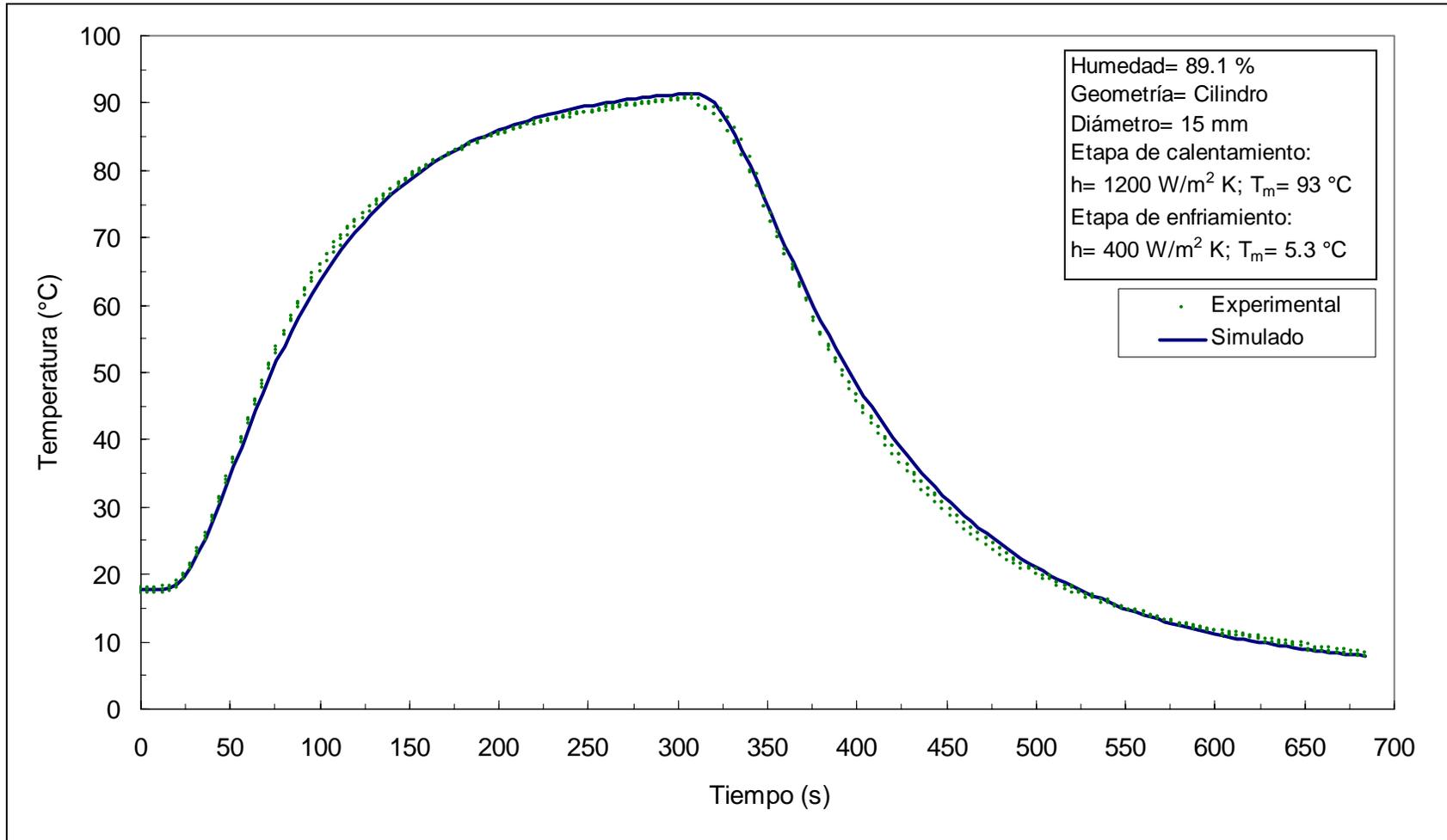


FIGURA 18. Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso combinado de escaldado ($95 \text{ }^\circ\text{C}$) - hidrogenfriado ($2 \text{ }^\circ\text{C}$) en floretes de brócoli de 50 mm, resultado de tres repeticiones.

encontraron por debajo del criterio ingenieril adoptado (10 % RMSE), siendo el mayor de 4,8 % para la etapa de escaldado y de 9,8 % para la etapa de hidrogenfriado.

Esto demuestra la adecuada descripción del proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de brócoli por el modelo computacional, implementado en el software Foodheatcool v 1.0 considerando al florete de brócoli como cilindro infinito.

CUADRO 10. Resumen de la raíz cuadrada del error promedio durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de brócoli de 50 mm.

<i>Proceso</i>	<i>Número de experiencias</i>	<i>RMSE (%)</i>			
		<i>Promedio</i>	<i>D.S</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>
Escaldado	48	1,8	0,8	4,8	0,3
Hidrogenfriado	48	5,1	2,3	9,8	1,9

La utilización de Foodheatcool v 1.0 para la simulación del proceso de calentamiento/enfriamiento en algunos alimentos de forma irregular compleja, como lo es el brócoli, presenta las siguientes ventajas.

- Se encuentra disponible “on-line” a través de Internet y en forma gratuita. Lo que significa una gran ventaja para todo tipo de usuarios.
- Es interactivo y fácil de utilizar. Por lo tanto no representa complicaciones al momento de operarlo para un usuario poco especializado.
- Es confiable en sus resultados. Diversas pruebas y análisis realizados por ZUÑIGA (2000) así lo demuestran.
- Es conocido y utilizado por estudiantes, docentes, investigadores y diferentes profesionales del país y de otros países como Perú, Venezuela, Argentina, Colombia, Ecuador, Cuba, México, España, Portugal, Italia, Inglaterra y Estados Unidos.

5 CONCLUSIONES

- El punto de más lento calentamiento/enfriamiento del florete de brócoli durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado, se encuentra localizado aproximadamente a una distancia de $5/6$ de la longitud total del tallo medido axialmente desde la base del florete.
- Aunque el brócoli entero, especialmente el conjunto pedúnculos-yemas florales presenta una forma irregular compleja, puede considerarse que la velocidad de penetración de calor en el punto de más lento calentamiento/enfriamiento es equivalente a la de un cilindro infinito del mismo calibre para simular el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado con el software Foodheatcool v 1.0.
- Los resultados obtenidos demostraron un buen ajuste entre los perfiles experimentales y los simulados. Los valores de RMSE (%) obtenidos fueron en promedio de un 1,8% para la etapa de escaldado y de un 5,1% para la etapa de hidrogenfriado. En ambas etapas los valores de RMSE (%) fluctuaron entre 0,3 % y 9,8 %, mostrando en todos los casos desviaciones estándares que no superaron el 3,0 %.
- El software desarrollado en el ICYTAL-UACH, basado en el método de diferencias finitas denominado Foodheatcool v 1.0, puede utilizarse para determinar tiempos de escaldado e hidrogenfriado en floretes de brócoli.

6 RESUMEN

El presente trabajo propone utilizar un software asistido por Internet desarrollado en el ICYTAL-UACH denominado Foodheatcool v 1.0, basado en el método de diferencias finitas, para calcular tiempos de escaldado e hidrogenfriado en alimentos de formas irregulares complejas, como es el caso de los floretes de brócoli. Para tal efecto se consideró la hipótesis de suponer que la velocidad de penetración de calor en el punto de más lento calentamiento/enfriamiento de un florete de brócoli es equivalente a la de un cilindro infinito del mismo calibre.

Se determinó experimentalmente que el punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de brócoli se encontraba ubicado aproximadamente a una distancia de $5/6$ de la longitud total del tallo medido axialmente desde la base del florete. La verificación de este punto, así como la comprobación de la hipótesis, se logró por intermedio de un software FEA (Análisis de Elementos Finitos), ALGOR v 15. Con este software CAE se realizaron las simulaciones del proceso de conducción de calor sobre un modelo digital 3D capturado de réplicas en yeso de floretes utilizando el digitalizador Microscribe 3DL y el software Rhinoceros 3.0 SR3c.

Los perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado a diferentes temperaturas y tiempos de tratamiento térmico reflejaron un buen ajuste. Los valores de RMSE (%) obtenidos fueron en promedio de un 1,8 % para la etapa de escaldado y de un 5,1 % para la etapa de hidrogenfriado. Estos resultados demuestran la factibilidad de calcular tiempos de proceso de escaldado e hidrogenfriado mediante el software Foodheatcool v 1.0, disponible “on-line” en www.wamfoodlab.uach.cl/.

SUMMARY

The present research suggest to use a web-aided software developed at ICYTAL-UACH named Foodheatcool v 1.0, based on the finite difference method to calculate blanching and hydrocooling times on complex and irregular-shaped foods as it is the case of florets of broccoli. For such effect, it was considered as hypothesis that the heat penetration rate in the slowest heating/cooling point of a floret broccoli is equivalent to an infinite cylinder of the same gauge.

It was determined experimentally that during the combined blanching/hydrocooling process on broccoli florets the slowest heating/cooling point was located approximately to a distance of 5/6 of the overall stem length measured axially from the floret base. The verification of this approach, as well as the validation of the hypothesis, was obtained using a FEA software (Finite Element Analysis), ALGOR v 15. With this CAE software it was running simulations of heat conduction processes on 3D digital models captured from plaster replicas of florets by using a digitizer Microscribe 3DL and the software Rhinoceros 3.0 SR3c.

Experimental and predicted temperature profiles for the several combined blanching and hydrocooling processes showed a good agreement. The obtained values of RMSE (%) were in average of 1,8 % for blanching and 5,1 % for hydrocooling. The latter demonstrated the feasibility to calculate blanching and hidrocooling times by using the software Foodheatcool v. 1.0, available “on-line” in www.wamfoodlab.uach.cl/.

7 BIBLIOGRAFIA

- ACHONDO, J.P. 1991. Equipos utilizados en el proceso de escaldado. En: Curso: Aspectos relevantes en la congelación de productos hortofrutícolas. Fundación Chile. Santiago. 13p.
- AGUILERA, F. 1996. Simulación del proceso global escaldado-hidrogenfriado de productos vegetales. Tesis Lic. Ing. Alimentos Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 230p.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS, (A.O.A.C). 1988. Official methods of the Association of officials analytical chemist. Horwitz, H. (ed). Association of Officials Analytical Chemist, Washington. 1018 p.
- BALASUBRAMANIAM, V.M. y SASTRY, S.K. 1994. Convective heat transfer at particle-liquid interface in continuous tube flow at elevated fluid temperature. J. Food Sc. 59(3): 675-681.
- BARRET, D.M y THEERAKULRAIT, C. 1995. Quality indicators in blanched, frozen, stored vegetables. Food Tech. 49 (1): 62-65.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E. y LIGHTFOOT, E.N. 1960. Transport phenomena. John Wiley & Sons, Inc. New York. 780 p.
- BIZOT, M. 1983. Using the "G.A.B." model to construct sorption isotherms. En: Physical properties of food. Applied Sc. Publishers Ltd. England. P 43-54.

- BOMBEN, J.L. 1977. Effluent generation, energy use, and cost of blanching. *J. Food Proc. Eng.* 1: 329-333.
- BRAVO, A. y ALDUNATE, P. 1986. El Cultivo del Brócoli. *El Campesino (Chile)*. 117 (9): 24-40.
- BURNETTE, F.S. 1977. Peroxidase and its relationship to food flavour and quality: areview. *J. Food Sc.* 44: 1-6.
- CALIFANO, A.N. 1981. Transferencia de calor y materia durante el escaldado de papas. Tesis de Ph. D. La Plata, Argentina. Universidad Nacional de La Plata. 133 p.
- CARSLAW, H.S y JAEGER, J.C. 1959. *Conduction of heat in solids*. Oxford at the Clarendon Press. 510 p.
- CARROAD, P.A., y SWARTZ, J.B. y BOMBEN, J.L. 1980. Yields and loss in water and steam blanching, water and air cooling, freezing and cooling of brocoli spears. *J. Food Sc.* 45: 1408-1410.
- CHOI, Y. y OKOS, M.R. 1986. Effects of temperature and compositions on the thermal properties of foods. In: *Food engineering and process application*. Vol I. Transport phenomena. Le Maguer, M. and Jelen, P. (eds). Elseiver Applied Science Co., Inc. New York. pp. 93-101.
- CLELAND, A.C. 1990. *Food refrigeration process*. Elsevier Science Publishing Co. Inc. N.Y. U.S.A. 248 p.
- CLELAND, A.C. y EARLE, R.L. 1984. Assesment of freezing time prediction method. *J. Food Sc.* 49: 1034-1042.

- CLELAND, A.C., CLELAND, D.J. y EARLE, R.L. 1987. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shape by simple formulae. Part 2: irregular shape. *Int. J. Refrig.* 10: 234-239.
- COFFELT, R.J. y WINTER, F.H. 1973. Evaporative cooling of blanched vegetables. *J. Food Sc.* 38: 39-43.
- CRC HANDBOOK (1996). *Handbook of Chemistry and Physics*, West. R.C. 54th edition. The Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio. USA.
- CUMMING, D.B., STRAK, R. y SAN FORD, K.A. 1981. The effect of an individual quick blanching method on ascorbic acid retention in select vegetables. *J. Food Processing and Preservation.* 5 (1): 31-37.
- CUMMING, D.B., STRAK, R. TIMBERS, G.E y COWMEADOW, R. 1985. A new blanching system for the food industry. II. Commercial desing and testing. *J. Food Processing and Preservation.* 8 (3/4): 115-133.
- DICKERSON, R.W. y READ, R. 1968. Calculation and measurement of heat transfer in foods. *Food Tech.* 22 (12): 92-105.
- DIETRICH, W.C., HUXSOLL, C.C y GUADAGNI, D.G. 1970. Comparison of microwave convectional and combination blanching of brussels sprouts for frozen storage. *Food Tech.* 24(6): 613-617.
- DRAKE, S.R y CARMICHAEL, D.M. 1986. Frozen vegetables quality as influenced by high temperature short time (HTST) steam blanching. *J. Food Sc.* 51: 1378-1379.
- DRAKE y SWANSON. 1986. Energy utilization during blanching (water vs. steam) of sweet corn and subsequent frozen quality. *J. Food Sc.* 51: 1081-1082.

- FELLOWS, P. 1988. Food processing thecnology: principles and practice. Ellis Horwood. Chinchester, 505 p.
- FENNEMA, O. 1993. Química de los alimentos. Editorial Acribia S.A. Zaragoza, España. 1095 p.
- GAFFNEY, J.J., BAIRD, C.C. y CHAU, K.V. 1985. Methods for calculating heat and mass tranfer in fruits and vegetables individually and in bulk. ASHRAE Transactions 85 (3): 333-352.
- GANTHAVORN, C. y POWERS, J.R. 1988. Changes in peroxidase activity, hexanal, ascorbic acid and free sulfhidryl in blanched asparagus during frozen storage. J. Food Sc. 53: 1403-1405.
- GARROTE, R.L, LUNA, J.A., SILVA, E.R. y BERTONE, R.A. 1987. Prediction of residual peroxidase activity in the blanching- cooling of corn-on-the-cob and its relation to off-flavor development in frozen storage. J. Food Sc. 52 : 232- 233.
- GEANKOPLIS, C. J. 1986. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., México. 759 p.
- GIBERT. H., BAXERRES, J.L y KIM, H. 1980. Blanching time in a fluidized bed. In: Food process engineering. Vol I. Food process system. Linko, P., Mälkki, Y., Olkku, J. Y., Larinkari, J. (eds). Applied Science Publishers Ltda. Ripple Road, Barking, Essex, England. pp. 75-85.
- GRUDA, Z. y POSTOLSKY, J. 1986. Tecnología de la congelación de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza. 63 p.

- HALPIN B.E y LEE, C.Y. 1987. Effect of blanching on enzyme activity and quality changes in greans peas. *J. Food Sc.* 52: 1002-1005.
- HELDMAN, D.R. y LUND, D.B. 1992. Handbook of food engineering. Edit by Dennis R. Heldman and Darly B. Lund. New York. 755 p.
- HERMSOM, A.C. y HULLAND, E.D. 1984. Conservas alimenticias. Editorial Acribia S.A. Zaragoza, España. 451 p.
- HOLDSWORTH, S.D. 1993. Congelación y refrigeración. En: Manual de industrias de los alimentos. Raken, M.D. (ed). Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. pp. 475-498.
- HOSSAIN, Md. M., CLELAND, D.J. y CLELAND, A.C. 1992. Prediction of freezing and thawing times for foods of regular multi-dimensional shape by using an analytically derived geometric factor. *Int J. Refrig.* 15: 227-234.
- HURT, H.D. 1979. Effect of canning on the nutritive value of vegetables. *Food Tech.* 3(2) : 84-86.
- KARLSSON, E. y LUH, B.S. 1988. Vegetable juices, sauces and soups. In: Commercial vegetable processing. Luh, B.S. and Woodroof, J.G. (eds). Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 287-342.
- KNUDSEN, J.G., BELL, K.J., HOLT, A.D., HOTTEL, H.C., SAROFIN, A.F., STANDIFORD, F.C., STUHLBARG, D. y UHL, V.W. 1984. Heat transmission. In: "Perry's Chemical engineer's handbook". Perry, R.H. y Green D.W. Harold Crawford & Beatrice E. Eckes. McGraw Hill, Inc. New York. U.S.A. Sección N° 10.

- KOPELMAN, I.J. 1966. Transient heat transfer and thermal properties in food systems. PhD Thesis. Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA.
- KRARUP, C. y MOREIRA, I. 1998. Hortalizas de estación fría. Biología y diversidad cultural. P. Universidad Católica de Chile, VRA, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Santiago, Chile. http://www.puc.cl/sw_educ/hort0498 (Accessed at 25/09/2003).
- LAY, S. 1993. Evaluación de la pérdida de ácido ascórbico durante el blanqueado de brócoli (*Brassica oleracea* variedad itálica). Tesis para optar al título de Ingeniero en Industrias Alimentarias Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- LAZAR, LUND, D.B. y DIETRICH, W. 1971. IQB: A new concept in blanching. Food Tech. 25 (7): 24-26.
- LEE, F.A. 1958. The blanching process. Adv. Food. Res. 8:63.
- LEES, M. 1996. A linear three level difference scheme for quasilinear parabolic equation. Mathematics of Computation 20: 516-522.
- LEONI, O., IONI, R. Y PALMIERI, S. 1985. Purification and properties of lipoxygenase in germinating sunflowers seeds. J. Food Sc. 50: 88-92.
- LEWIS, M.J. 1990. Physical properties of foods and food processing system. Ellis Horwood Limited. New York. 465 p.
- LIMA, M. y SASTRY, S.K. 1990. Influence of fluids rheological properties and particle location on ultra-sound assisted heat transfer between liquid and particles. J. Food Sc. 55: 1112-1115.

- LUH, B.S. y KEAN, C.E. 1988. Canning of vegetables. In: Commercial vegetable processing. Luh, B.S. and Woodroof, J.G. (eds). Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 195-285.
- LUH, B.S. y LORENZO, M.C. 1988. Freezing of vegetables. In: Commercial vegetable processing. Luh, B.S. and Woodroof, J.G. (eds). Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 342-386.
- LUNA, J.A., GARROTE, R.L. y BRESSAN, J.A. 1986. Thermo-kinetic modeling of peroxidase inactivation during blanching –cooling of corn on the cob. *J. Food Sc.* 51: 141-145.
- LUND, D.B. 1977. Design of thermal process for maximizing nutrient retention. *Food Tech.* 31(2): 71-78.
- LUND, D.B., BRUIN S. Jr. y LAZAR, M.E. 1972. Internal temperature distribution during individual quick blanching. *J. Food Sc.* 37: 167.
- MONTEFUSCO, P. 1997. Variación de parámetros de calidad en jugo de zanahoria en función del momento de cosecha. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 63 p.
- MORALES-BLANCAS, E.F. 1997. Simulación numérica de la transferencia de calor y cinética de desactivación enzimática durante el proceso global escaldado-hidrogenfriado de productos vegetales. Actas X Seminario Latinoamericano y del Caribe de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Buenos Aires, Argentina. pp. 1-18.

- MORALES-BLANCAS, E.F., ZUÑIGA, G.M., CARRASCO, E.R. 1999. Predicción de perfiles de temperatura durante el proceso combinado escaldado-hidrogenfriado de productos vegetales. Caso formas cilíndricas. XVI Jornadas de Transferencia de Calor y Materia. Santiago, Chile. p.197.
- MORALES-BLANCAS, E.F. y PINO, F. 2002. Determinación de propiedades másicas y parámetros de forma para alimentos de formas irregulares mediante digitalización 3D. Libro de Resúmenes. XIV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Chillán, Chile. p. 72.
- MORALES-BLANCAS, E.F., RODRIGUEZ, C.P., SIMPSON, R. 2003. Simulation of heat conduction processes in nonsymmetric and irregular-shaped foods. Libro de Resúmenes. IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería en Alimentos. Valparaíso, Chile. p. 102.
- MYERS, G.E. 1971. Analytical methods in conduction heat transfer. Mc Graw-Hill Book Company. New York. 508 p.
- NICHOLAS, J.V. y WHITE, D.R. 1994. Traceable temperatures: An introduction to temperature measurement and calibration. John Wiley & Sons. Chichester. England. 357 p.
- OLHAGARAY, J.M. 1991. Principios básicos del proceso de escaldado. In: Curso: Aspectos relevantes en la congelación de productos hortofrutícolas. Fundación Chile. Santiago. 15 p.
- ORDOÑEZ, J. 1996. Determinación y evaluación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en procesos continuos de escaldado e hidrogenfriado. Tesis Lic. en Ing. en Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 154 p.

- ÖZISIK, M.N. 1977. Basic heat transfer. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. Tokyo, Japón. 572 p.
- PEREZ, O. 1997. Comparación y evaluación de diversos métodos fórmula para el cálculo de tiempos efectivos de congelación en alimentos de geometrías regulares. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 245 p.
- PINO, F. 2004. Obtención de modelos digitales de alimentos de formas irregulares complejas mediante digitalización tridimensional. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 84 p.
- PLANK, R. 1963. El empleo del frío en la industria de la alimentación. Editorial Reverté. Barcelona. 805 p.
- POULSEN, K.P. 1986. Optimization of vegetables blanching. Food tech. (6): 122-129.
- POWERS, J.R., COSTELLO, M.J. y LEUNG, H.K. 1984. Peroxidase fractions from asparagus of varying heat stabilities. J. Food Sc. 49: 1618-1619.
- REES, J.A.G y BETTISON, J. 1993. Enlatado. En: Manual de industrias de los alimentos. Ranken, M.D. (ed). Editorial Acirbia S.A. Zaragoza, España. 242-292.
- RODRIGUEZ, C. 2004. Simulación computacional de procesos de conducción de calor en alimentos de formas irregulares complejas. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 120 p.
- RUMSEY, T.R., SCOTT, E.P. y CARROAD, P. A. 1981. Energy compstion in water blanching. J. Food Sc. 47: 295-298.

- SCHNEIDER, P.J. 1957. Conduction heat transfer. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, Massachusetts. 395 p.
- SHAMS, M.A. y THOMPSON, D.R. 1987. Quantitative determination of pea losses as affected by convectional water blanching. *J. Food Sc.* 52: 1006-1009.
- SINGH, R.P. 1982. Thermal diffusivity in food processing. *Food Tech.* 36 (2): 86-91.
- SINGH, R.P. y CHEN, G. 1980. Lethality-Fourier number to predict blanching. In: *Food process engineering. Vol I. Food process system.* Linko, P., Mälkki, Y., Olkku, J. Y., Larinkari, J. (eds). Applied Science Publishers Ltda. Ripple Road, Barking, Essex, England. pp. 70-74.
- SINGH, R.P. y HELDMAN, D.R. 1993. *Introduction to food engineering.* Academic Press, Inc. San Diego, California . 499 p.
- SOMOGYI, L.P y LUH, B.S. 1988. Vegetable dehydration. In: *Commercial vegetable processing.* Luh, B.S. and Woodroof, J.G. (eds). Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 397-473.
- STEEL, R.G. y TORRIE, J.H. 1960. *Principles and procedures of statistics.* Mc Graw-Hill Book Co. Inc. N.Y. USA.
- STUMBO, C.R. 1965. *Thermobacteriology in food processing.* Academic press Inc., Ltd. New York. 236 p.
- SWARTZ, J.B. y CARROAD, P.A. 1981. A cooling system with water recycle for blanched vegetables. *J. Food Sc.* 46: 440-444.

- SWEAT, V.E. 1974. Experimental value of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. *J. Food Sc.* 39: 1080-1083.
- TIMBERS, G.E., STARK, R. y CUMMING, D.B. 1984. A new blanching system for the food industry I: Design, construction and testing of a pilot plant prototype. *J. Food Processing and Preservation.* 8 (2): 115-133.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, (USDA). 1980. United States Standards for Grades of Frozen Broccoli. Available in: <http://www.ams.usda.gov/standards/fzbrocco.pdf> (Accessed at 25/09/2003).
- WADSWORTH, J.I. y SPADARO, J.J. 1969. Transient temperature distribution in whole sweet potato roots during immersion heating. 1. Thermal diffusivity of sweetpotatoes. *Food Tech.* 23 (2): 85-89.
- WATT, B. y MERRIT, A. 1975. Composition of foods. *Agricultural Handbook N° 8.* Unites States Departament of Agricultural. 198 p.
- WOODROOF, J.G. 1988. Preparing vegetables for processing. In: *Commercial vegetables processing.* AVI Book, Van Nostrand Reinhold. New York. pp: 175-192.
- ZHANG, Q. y CAVALIERI, R.P. 1991. Thermal model for steam blanching of green beans and determination of surface heat transfer coefficient. *Transaction of the ASAE.* 34 (1): 182-186.
- ZUÑIGA, G. 2000. Validación experimental y evaluación de un modelo de diferencias finitas utilizado para describir el proceso combinado escaldado-hidrogenfriado en alimentos de formas regulares. Tesis Lic. Ing. Alimentos Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 187 p.

ANEXOS

ANEXO 1

Detalle de la raíz cuadrada del error promedio durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenfriado en floretes de brócoli de 50 mm.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Repetición</i>	<i>ESCALDADO-HIDROENFRIADO</i>							
		<i>Tratamiento 1</i>		<i>Tratamiento 2</i>		<i>Tratamiento 3</i>		<i>Tratamiento 4</i>	
		<i>65°C</i>	<i>2°C</i>	<i>75°C</i>	<i>2°C</i>	<i>85°C</i>	<i>2°C</i>	<i>95°C</i>	<i>2°C</i>
1	R1	2,3	3,2	2,1	2,1	2,3	4,0	2,8	7,3
	R2	4,0	2,6	1,4	3,2	2,4	4,3	2,7	4,7
	R3	2,3	2,6	1,8	1,9	2,3	7,5	2,8	4,6
	Promedio	2,9	2,8	1,7	2,4	2,3	5,3	2,7	5,6
	D.S.	1,0	0,3	0,4	0,7	0,0	1,9	0,1	1,5
3	R1	1,1	5,2	4,8	9,5	0,7	3,6	2,0	3,5
	R2	1,5	5,1	3,1	9,0	2,2	8,2	1,9	7,9
	R3	0,7	4,5	1,5	4,1	2,0	5,2	1,8	3,7
	Promedio	1,1	4,9	3,1	7,6	1,6	5,6	1,9	5,0
	D.S.	0,4	0,4	1,6	3,0	0,8	2,4	0,1	2,5
5	R1	1,5	2,1	0,9	5,0	1,5	3,6	1,4	5,4
	R2	0,9	2,4	1,6	4,7	2,2	9,6	2,1	2,8
	R3	0,3	2,6	1,3	4,0	1,3	6,7	1,7	2,7
	Promedio	0,9	2,4	1,3	4,6	1,7	6,6	1,8	3,6
	D.S.	0,6	0,2	0,3	0,5	0,5	3,0	0,4	1,5
10	R1	1,7	4,4	1,4	9,8	1,4	6,1	1,5	8,4
	R2	0,8	2,1	1,0	7,1	0,8	3,7	2,0	7,0
	R3	1,3	7,3	1,9	4,5	1,4	3,8	1,8	9,3
	Promedio	1,3	4,6	1,5	7,1	1,2	4,5	1,8	8,2
	D.S.	0,4	2,6	0,4	2,7	0,4	1,4	0,2	1,1
Promedio tratamiento		1,5	3,7	1,9	5,4	1,7	5,5	2,0	5,6
D.S tratamiento		1,0	1,6	1,1	2,8	0,6	2,1	0,5	2,3

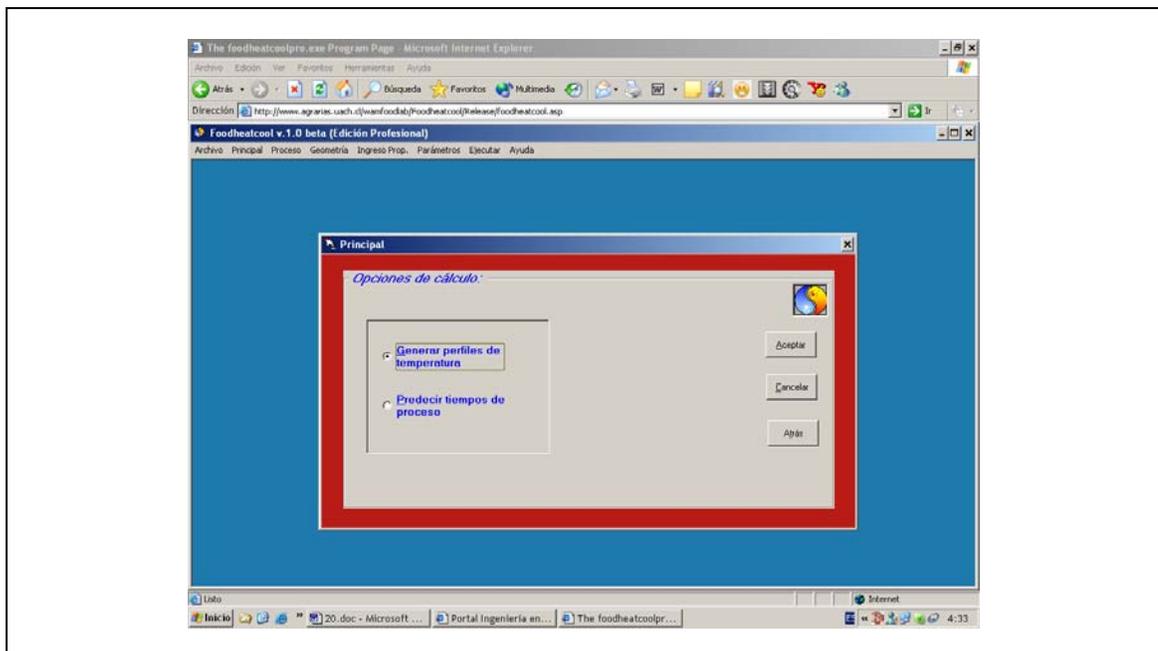
ANEXO 2

Ventanas del software “on-line” Foodheatcool v 1.0.

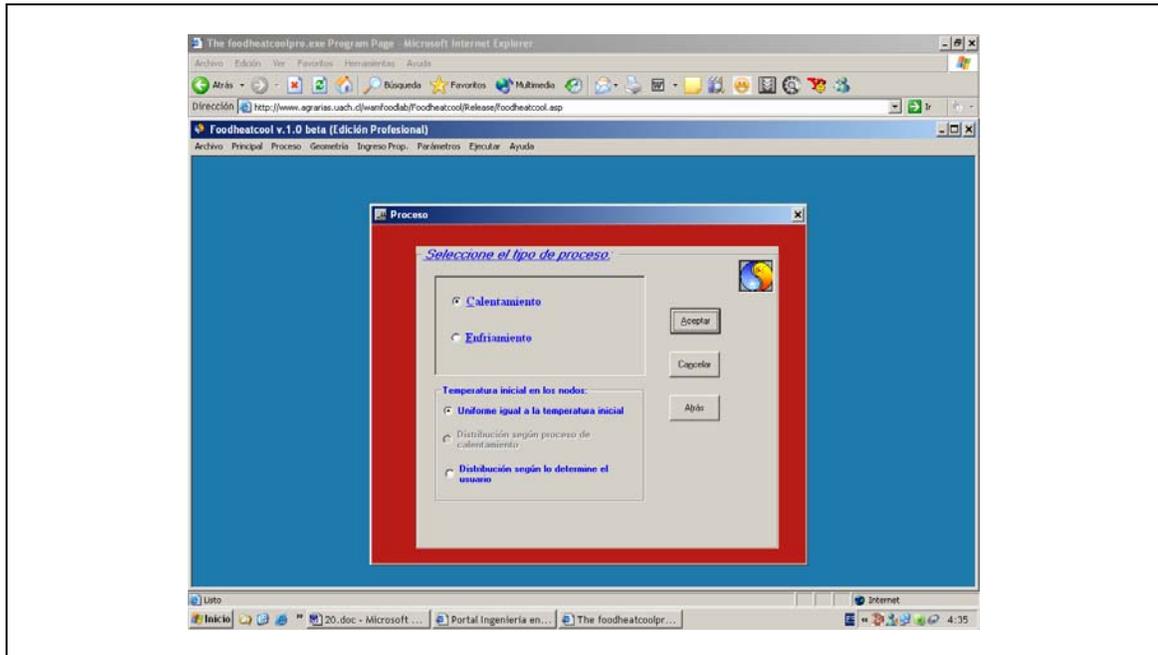
ANEXO 2.1 Ventana de acceso principal.



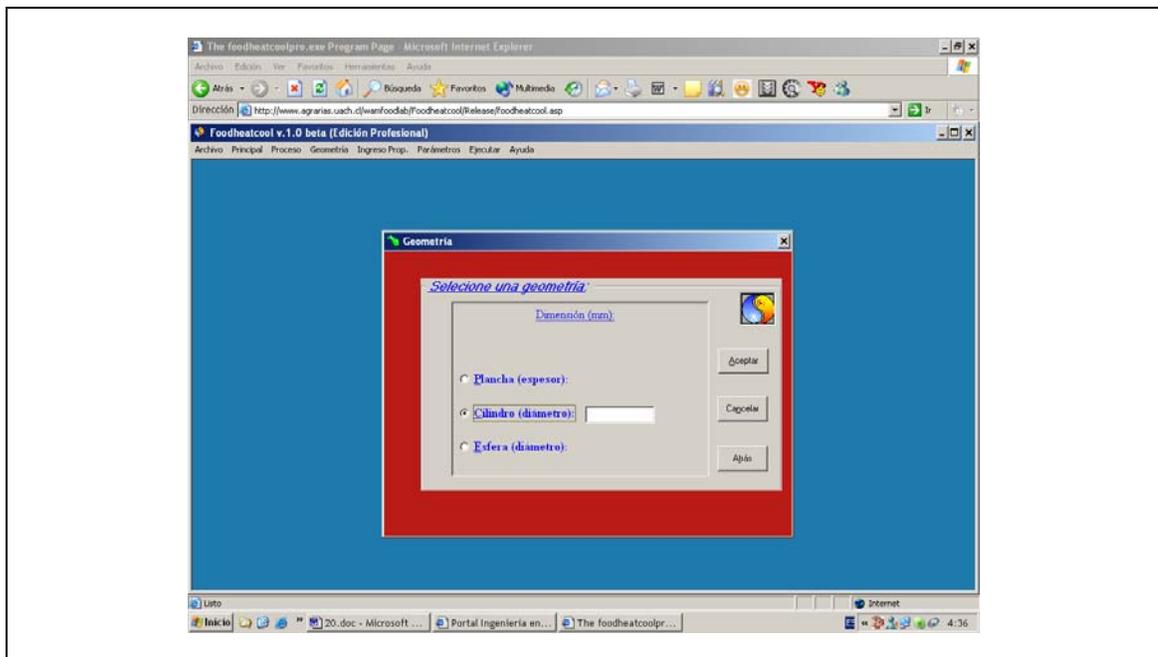
ANEXO 2.2 Ventana para opciones de cálculo.



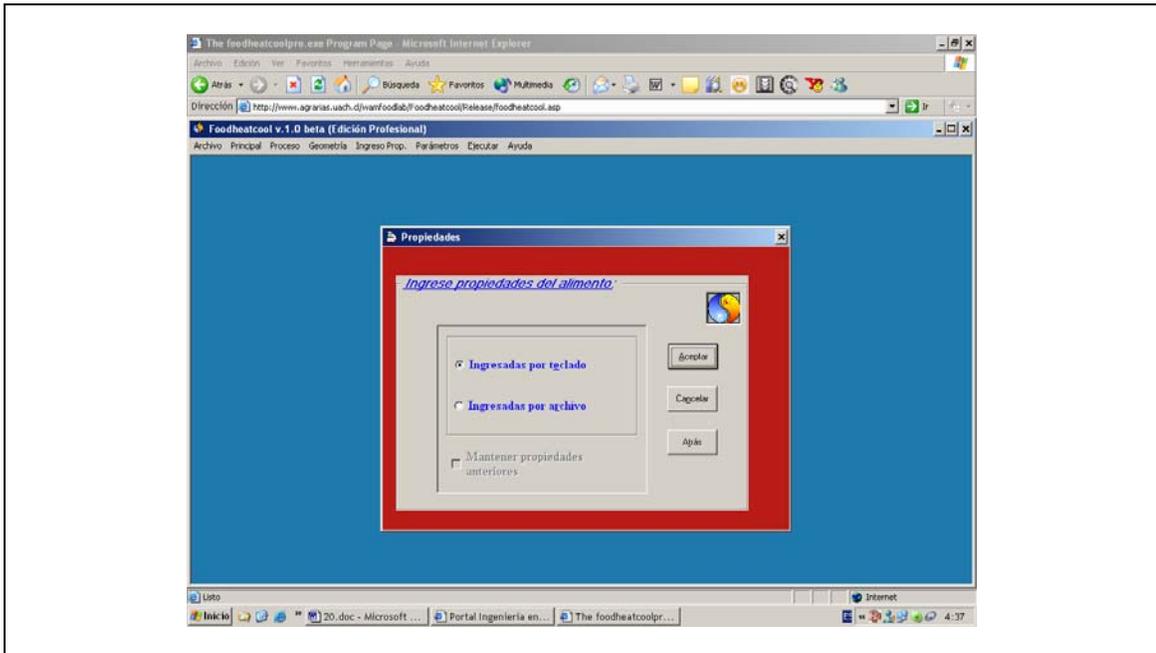
ANEXO 2.3 Ventana para seleccionar el tipo de proceso.



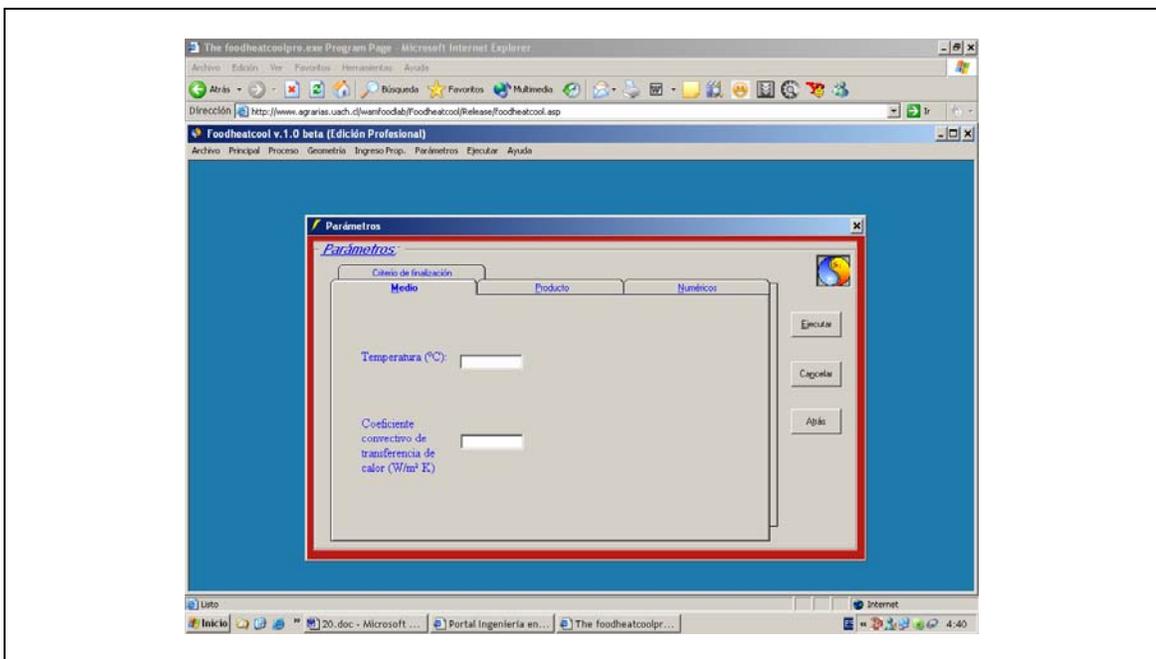
ANEXO 2.4 Ventana para seleccionar la geometría.



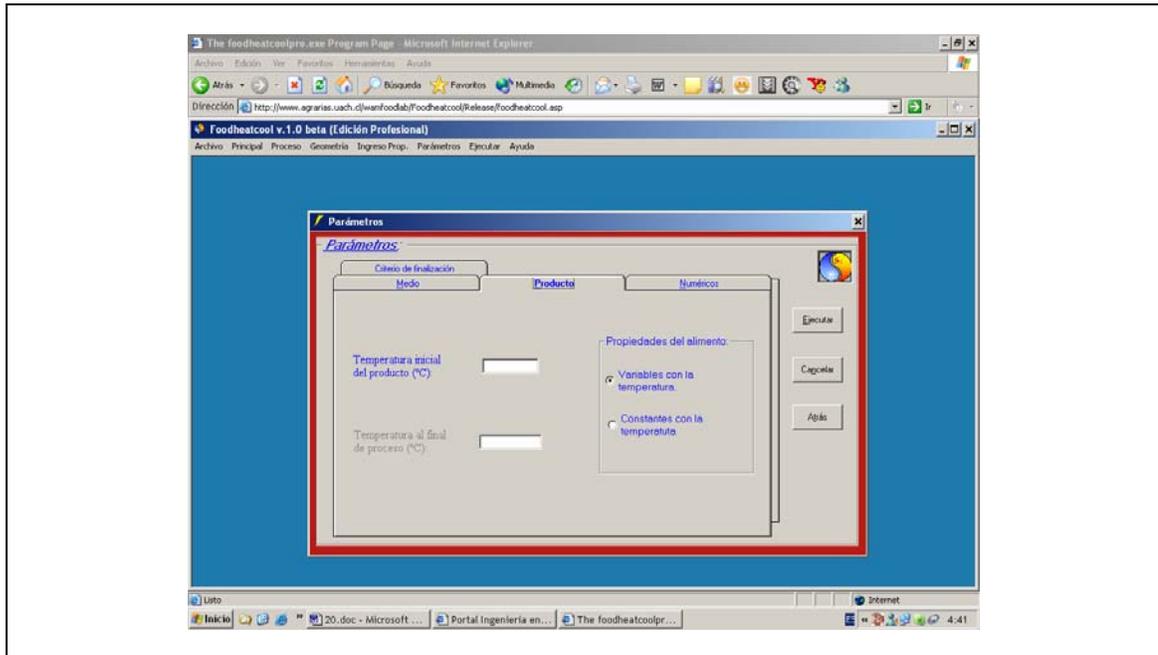
ANEXO 2.5 Ventana para ingresar las propiedades del alimento.



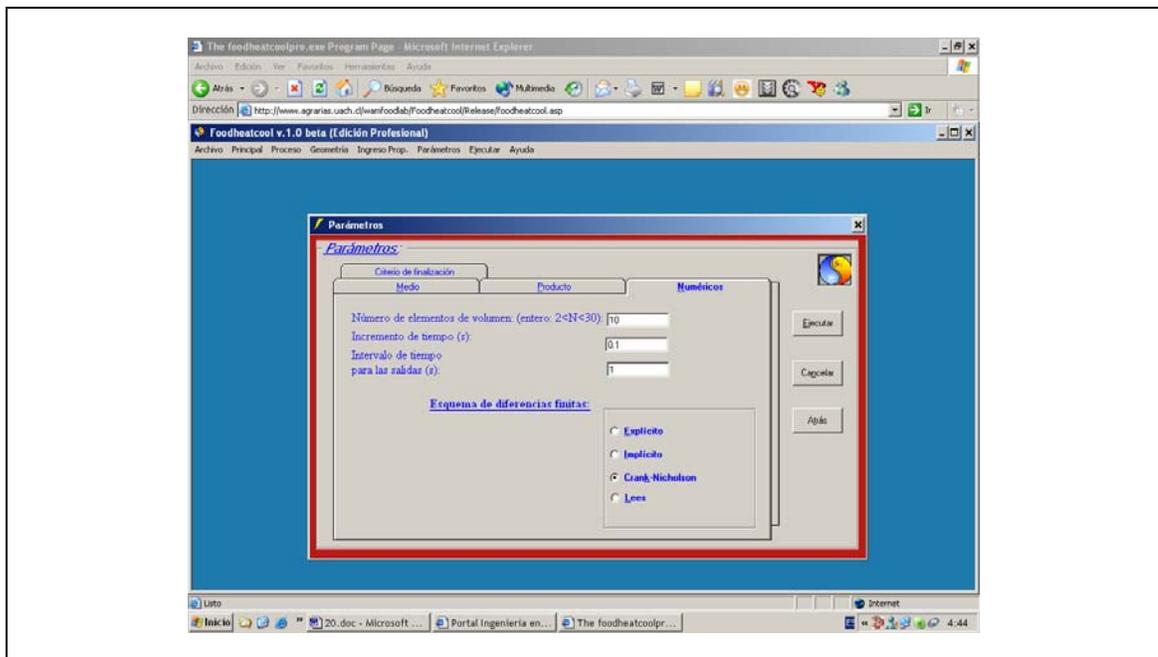
ANEXO 2.6 Ventana para ingresar los parámetros del medio.



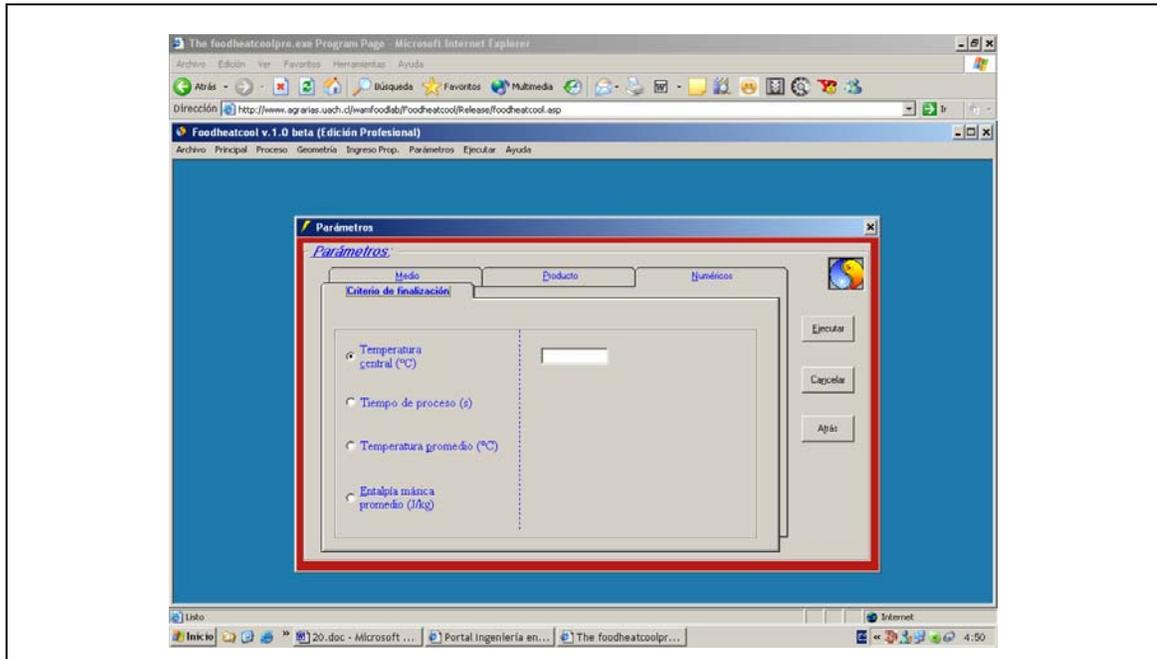
ANEXO 2.7 Ventana para ingresar los parámetros del producto.



ANEXO 2.8 Ventana para ingresar los parámetros numéricos.



ANEXO 2.9 Ventana para ingresar los parámetros de finalización.



ANEXO 2.10 Ventana de resultados.

