

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

**Simulación Computacional de Procesos de Conducción  
de Calor en Alimentos de Formas Irregulares Complejas**

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

**Cristian Patricio Rodríguez Rojas**

VALDIVIA – CHILE

2005

---

**PROFESOR PATROCINANTE**

**Elton Morales-Blancas**

Ingeniero en Industrias Alimentarias, M. Sc.  
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

---

**PROFESOR INFORMANTE**

**Erwin Carrasco Ruiz**

Ingeniero Civil Químico  
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

---

**PROFESOR INFORMANTE**

**Rogelio Moreno Muñoz**

Ingeniero Civil Mecánico, M. Sc.  
Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos

*A mis Padres*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Elton Morales Blancas, patrocinante y guía en la presente investigación, y a los profesores informantes Erwin Carrasco y Rogelio Moreno.

A la Dirección de Investigación y Desarrollo (DID) de la Universidad Austral de Chile, a través de los Proyectos PEF 2003-02 y S-2004-16, que hicieron posible el desarrollo del presente trabajo de tesis.

Al Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL) y todo su cuerpo docente por los conocimientos entregados a lo largo de la carrera, así como también a sus funcionarios.

A Francisco Pino, Miguel Ángel Gallardo y Miguel Gutiérrez por su invaluable cooperación y compañerismo durante la presente investigación.

A Pat Tessaro y Facundo Miri, soporte técnico de los software ALGOR® y Rhinoceros® respectivamente.

A mis hermanas Patricia y Gloria, por su preocupación, ayuda y apoyo.

A Claudia, por su amor, comprensión y apoyo incondicional en todo momento.

A todos mis compañeros, en especial a Fausto, Marcela, Eduardo, Claudia, Alejandro, con quienes compartí inolvidables momentos.

A todos mis amigos, en especial a quienes fueron apoyo durante el desarrollo de esta tesis, Marcelo, Coté, Lalo, y a Francisco, Pato y Leo por los buenos momentos compartidos con la banda.

## INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Modelo matemático	4
2.1.1	Ecuaciones de gobierno	4
2.1.2	Condiciones de frontera	5
2.1.3	Condiciones iniciales	6
2.1.4	Parámetros involucrados en la velocidad de transferencia de calor	7
2.1.4.1	Propiedades termofísicas	7
2.1.4.1.1	Conductividad térmica ( $k$ )	7
2.1.4.1.2	Densidad ( $\rho$ )	8
2.1.4.1.3	Calor específico ( $C_p$ )	8
2.1.4.1.4	Difusividad térmica ( $\alpha$ )	8
2.1.4.2	Coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h$ )	9
2.1.4.2.1	Números adimensionales	10
2.1.4.2.2	Relaciones adimensionales	12
2.1.4.2.3	Ecuaciones adimensionales	13
2.2	Simulación de procesos	15
2.2.1	Diseño Asistido por Computador (CAD)	17
2.2.1.1	Modelo geométrico	17
2.2.1.1.1	Geometrías regulares, irregulares y complejas	18
2.2.1.1.2	Ingeniería reversa	19
2.2.1.1.3	NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)	22

2.2.2	Intercambio de Datos CAD/CAE	24
2.2.3	Ingeniería Asistida por Computador (CAE)	26
2.3	Método de Elementos Finitos ( <i>FEM, Finite Element Method</i> )	26
2.3.1	Generación de la malla ( <i>mesh</i> )	36
2.3.1.1	Técnicas de generación de malla	38
2.3.1.1.1	Mallas estructuradas	38
2.3.1.1.2	Mallas no estructuradas	38
2.3.1.1.3	Mallas adaptivas	39
2.3.1.2	Tipos de elementos en análisis térmico	41
2.3.1.2.1	Elementos 2D	41
2.3.1.2.2	Elementos ladrillo ( <i>Brick</i> )	42
2.3.1.2.3	Elementos tetraédricos ( <i>Tetrahedra</i> )	43
2.3.1.2.4	Elementos barra ( <i>Rod</i> )	43
2.3.1.2.5	Elementos placa ( <i>Plate</i> )	43
2.3.1.2.6	Elementos de frontera ( <i>Thermal Boundary</i> )	43
2.3.1.3	Criterios de mallado	44
2.3.2	Modelo del material	46
2.3.2.1	Material isotrópico	46
2.3.2.2	Material anisotrópico	46
2.3.2.3	Material ortotrópico	46
2.3.3	Propiedades del material	47
2.3.4	Método de solución	49
2.3.5	Análisis (procesamiento)	50
2.3.6	Revisión de resultados (post-procesamiento)	50
2.3.7	Confiabledad de los resultados computacionales	51
2.3.8	Ventajas y desventajas del Método de Elementos Finitos	53
3	MATERIAL Y MÉTODO	56
3.1	Lugar de ejecución	56

3.2	Materiales y equipos	56
3.2.1	Materias primas	56
3.2.1.1	Turiones de espárragos verdes	56
3.2.1.2	Floretes de Brócoli	58
3.2.1.3	Camarones (Gambas)	59
3.2.2	Experimentación en laboratorio	61
3.2.3	Sistema de Replicado	64
3.2.4	Sistema de Digitalización	64
3.2.5	Sistema de Simulación	65
3.2.6	Otros	66
3.3	Metodología	68
3.3.1	Modelación matemática del fenómeno físico	68
3.3.1.1	Ecuación de gobierno	69
3.3.1.2	Condiciones iniciales	69
3.3.1.3	Condiciones de borde considerando un dominio irregular 3D	70
3.3.2	Adiestramiento en el uso de los software	70
3.3.3	Experimentación en laboratorio	71
3.3.3.1	Calibración de las termocuplas	71
3.3.3.2	Implementación del sistema de hidrocalentamiento/ hidroenfriamiento	71
3.3.3.3	Selección y preparación de las muestras	72
3.3.3.4	Fijación de los alimentos en la rejilla	75
3.3.3.5	Inserción de las termocuplas	75
3.3.3.6	Configuración del Data-logger	76
3.3.3.7	Tratamiento térmico	77
3.3.4	Obtención del modelo digital de los alimentos	78
3.3.4.1	Obtención de réplicas de los alimentos	78
3.3.4.2	Trazado de una malla	82
3.3.4.3	Digitalización 3D	83

3.3.4.4	Generación del modelo digital 3D	84
3.3.4.5	Modelado 3D	86
3.3.5	Intercambio CAD/CAE	88
3.3.6	Simulación del proceso térmico en ALGOR®	89
3.3.6.1	Elección del escenario del diseño	90
3.3.6.2	Generación de la malla ( <i>mesh</i> )	90
3.3.6.3	Pruebas de convergencia	93
3.3.6.4	Definición del sistema de unidades	97
3.3.6.5	Definición de los elementos	98
3.3.6.6	Especificación del material de los elementos	98
3.3.6.7	Especificación de las cargas de superficie	100
3.3.6.8	Estimación del Coeficiente convectivo de transferencia de calor	102
3.3.6.9	Ingreso de los parámetros del análisis	104
3.3.6.10	Análisis	107
3.3.6.11	Revisión de resultados	108
3.3.7	Ubicación de los puntos evaluados	109
3.3.8	Determinación del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales	109
4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	111
4.1	Turiones de espárragos verdes	111
4.1.1	Modelo digital 3D	111
4.1.2	Modelo mallado	111
4.1.3	Diagramas de contorno	112
4.1.4	Estadísticas de los modelos en ALGOR®	112
4.1.5	Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados	113
4.1.6	Valores de RMSE	116
4.2	Floretes de Brócoli	130

4.2.1	Modelo digital 3D	130
4.2.2	Modelo mallado	130
4.2.3	Diagramas de contorno	130
4.2.4	Estadísticas de los modelos en ALGOR®	131
4.2.5	Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados	132
4.2.6	Valores de RMSE	133
4.3	Camarones (Gambas)	147
4.3.1	Modelo digital 3D	148
4.3.2	Modelo mallado	148
4.3.3	Diagramas de contorno	148
4.3.4	Estadísticas de los modelos en ALGOR®	148
4.3.5	Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados	149
4.3.6	Valores de RMSE	151
5	CONCLUSIONES	165
6	RESUMEN	167
	SUMMARY	168
7	BIBLIOGRAFÍA	169
	ANEXOS	179

**INDICE DE CUADROS**

Cuadro		Página
1	Valores aproximados del coeficiente convectivo de transferencia de calor	10
2	Especificaciones de las termocuplas Physitemp® utilizadas	62
3	Especificaciones de las termocuplas desmontables utilizadas	63
4	Parámetros experimentales para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en los alimentos utilizados	77
5	Tamaños de malla elegidos para las pruebas de convergencia	93
6	Parámetros del modelo comunes a todos los análisis	94
7	Resultados de las pruebas de convergencia	95
8	Composición de los alimentos utilizados, según bibliografía	99
9	Composición de los alimentos ingresada en FoodProperty	99
10	Propiedades termofísicas de los alimentos arrojadas por FoodProperty	99
11	Parámetros del evento comunes a todos los análisis en ALGOR®	104
12	Condiciones de frontera aplicadas a los alimentos en la simulación	105
13	Estadísticas de los modelos digitales de espárragos verdes en ALGOR®	112
14	Características del nodo evaluado para los turiones de espárragos digitales	113

15	Características del nodo correspondiente al centro térmico en los turiones de espárragos digitales	114
16	Valores de RMSE para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en turiones de espárragos verdes	117
17	Estadísticas de los modelos digitales de los floretes de brócoli en ALGOR®	131
18	Características del nodo evaluado para los floretes de brócoli digitales	132
19	Características del nodo correspondiente al centro térmico de los floretes de brócoli digitales	132
20	Valores de RMSE para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en floretes de brócoli	133
21	Estadísticas de los modelos digitales de camarón en ALGOR®	149
22	Características del nodo evaluado para los camarones digitales	150
23	Características del nodo correspondiente al centro térmico en los camarones digitales	150
24	Valores de RMSE para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en camarones	151

## INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Brazo robótico digitalizador	21
2	Curva NURBS (azul) con sus puntos de control (negro)	23
3	Cilindro con malla y detalle de un elemento con sus nodos	29
4	La distribución de temperatura en una aleta uni-dimensional	32
5	Los puntos nodales y los valores asumidos de $T(x)$	32
6	División del dominio en elementos	33
7	Modelos discretos para la distribución de temperatura uni-dimensional	34
8	Pasos de un análisis típico por elementos finitos	35
9	El proceso de generación de la malla	37
10	Elementos 2D axisimétricos	42
11	Elementos 2D planares	42
12	Tipos de elementos en el análisis térmico	44
13	Concepto de Isotropía y Ortotropía	47
14	Espárragos ( <i>Asparagus officinalis</i> L )	56
15	Brócoli ( <i>Brassica oleracea</i> L )	58
16	Camarón o Gamba ( <i>Haliporoides diomedeeae</i> )	59
17	Baño de agua termorregulado marca GCA/PRECISION SCIENTIFIC	61
18	Termocuplas tipo T marca Physitemp® utilizadas	62
19	Termocupla desmontable Cole-Parmer y su mango	63
20	Data Logger marca Digi-Sense de 12 canales	64
21	Brazo digitalizador Microscribe-3DL™	65
22	Turiones de espárragos cortados	73

23	Pella o “cabeza” de brócoli	74
24	Floretes extraídos de una cabeza de brócoli	74
25	Camarones (gambas) frescos	75
26	Alimentos codificados y fijados en la rejilla con las termocuplas insertadas	76
27	Obtención de réplica de yeso de un espárrago con alginato	79
28	Réplicas finales en yeso de turiones de espárrago	79
29	Florete de brócoli en yeso y en 3D resultados de ensayos iniciales	80
30	Extracción de los pedúnculos y yemas florales de un florete de brócoli	81
31	Réplicas finales en yeso de tallos de floretes de brócoli	81
32	Camaron al cual se le han extraído las patas y antenas	82
33	Réplica final en yeso de un camarón	82
34	Trazado de la malla en la réplica de yeso de un espárrago	83
35	Captura de puntos de la malla de la réplica de yeso de un espárrago con el brazo digitalizador Microscribe-3DL™	83
36	Matriz de puntos 3D de un espárrago capturada en el software Rhinoceros®	84
37	Modelo 3D de un espárrago digitalizado en el software Rhinoceros®	85
38	Acercamiento de un modelo 3D de un turión de espárrago en el software Rhinoceros®	85
39	Proceso de modelación 3D de un florete de brócoli en Rhinoceros®	87
40	Modelo 3D sin detalles de un camarón en Rhinoceros®	88
41	Modelo 3D detallado de un camarón modelado en Rhinoceros®	88
42	Modelo 3D de un espárrago importado en el software ALGOR®	89

43	Ventana de elección de escenario del diseño en ALGOR®	90
44	Ventana de elección del tamaño de la malla en ALGOR®	91
45	Malla de superficie de un modelo de espárrago en ALGOR®	92
46	Generación de elementos en ALGOR®	92
47	Malla con refinamiento en un modelo de espárrago en ALGOR®	96
48	Ventana de definición de unidades en ALGOR®	97
49	Ventana de definición de elementos en ALGOR®	98
50	Ventana de especificación del material de los elementos en ALGOR®	100
51	Ventana de propiedades de superficie en ALGOR®	101
52	Superficies con cargas aplicadas en un modelo de espárrago en ALGOR®	102
53	Especificación del número y tamaño de paso de tiempo y del intervalo de salida de resultados en ALGOR®	106
54	Ingreso de una curva de carga de temperatura para el proceso hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en ALGOR®	106
55	Ingreso de la temperatura nodal inicial y del solucionador en ALGOR®	107
56	Ventana de progreso de un análisis en ALGOR®	108
57	Perfiles de temperatura simulados en ALGOR® durante el proceso combinado escaldado-hidrogenfriado de espárragos verdes	116
58	Modelo digital 3D del espárrago “1” en Rhinoceros®	118
59	Modelo mallado del espárrago “1” en ALGOR®	119
60	Corte longitudinal del diagrama de contorno del espárrago “1” en ALGOR®	120
61	Modelo digital 3D del espárrago “2” en Rhinoceros®	121
62	Modelo mallado del espárrago “2” en ALGOR®	122
63	Corte longitudinal del diagrama de contorno del espárrago “2”	123

	en ALGOR©	
64	Modelo digital 3D del espárrago “6” en Rhinoceros©	124
65	Modelo mallado del espárrago “6” en ALGOR©	125
66	Corte longitudinal del diagrama de contorno del espárrago “6” en ALGOR©	126
67	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento del espárrago “1”	127
68	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento del espárrago “2”	128
69	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento del espárrago “6”	129
70	Modelo digital 3D del brócoli “2” en Rhinoceros©	135
71	Modelo mallado del brócoli “2” en ALGOR©	136
72	Corte longitudinal del diagrama de contorno del brócoli “2” en ALGOR©	137
73	Modelo digital 3D del brócoli “3” en Rhinoceros©	138
74	Modelo mallado del brócoli “3” en ALGOR©	139
75	Corte longitudinal del diagrama de contorno del brócoli “3” en ALGOR©	140
76	Modelo digital 3D del brócoli “4” en Rhinoceros©	141
77	Modelo mallado del brócoli “4” en ALGOR©	142
78	Corte longitudinal del diagrama de contorno del brócoli “4” en ALGOR©	143
79	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en brócoli “2”	144
80	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el	145

	proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en brócoli “3”	
81	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en brócoli “4”	146
82	Diagrama de contorno de un análisis inicial del modelo digital detallado del camarón “1”	147
83	Modelo digital 3D del camarón “1” en Rhinoceros©	153
84	Modelo mallado del camarón “1” en ALGOR©	154
85	Corte longitudinal del diagrama de contorno del camarón “1” en ALGOR©	155
86	Modelo digital 3D del camarón “2” en Rhinoceros©	156
87	Modelo mallado del camarón “2” en ALGOR©	157
88	Corte longitudinal del diagrama de contorno del camarón “2” en ALGOR©	158
89	Modelo digital 3D del camarón “3” en Rhinoceros©	159
90	Modelo mallado del camarón “3” en ALGOR©	160
91	Corte longitudinal del diagrama de contorno del camarón “3” en ALGOR©	161
92	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en camarón “1”	162
93	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en camarón “2”	163
94	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en camarón “3”	164

**INDICE DE ANEXOS**

Anexo		Página
1	Ejemplo de cálculo de composición proximal ponderada a partir del contenido de humedad	180
2	Propiedades del agua en función de la temperatura	181
3	Ejemplo de cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor	182
4	Detalle del proceso de modelación 3D de los alimentos utilizados	184
5	Parámetros de caracterización de los alimentos evaluados	192
6	Parámetros para la estimación del coeficiente convectivo $h$ para cada caso evaluado	193
7	Diagramas de contorno de cada alimento de los tratamientos simulados en ALGOR©.	194

## NOMENCLATURA

### Símbolos romanos

$A$	Área superficial ( $m^2$ )
$C_p$	Calor específico ( $J/kg\ K$ )
$D$	Dimensión característica (m)
$f$	Función
$g$	Aceleración de gravedad ( $m/s^2$ )
$h$	Coefficiente convectivo de transferencia de calor ( $W/m^2\ K$ )
$k$	Conductividad térmica ( $W/m\ K$ )
$L$	Longitud (m)
$q$	Flujo de calor (W)
$T$	Temperatura ( $^{\circ}C$ ; K)
$t$	Tiempo (min; s)
$V$	Volumen ( $m^3$ )
$x$	Coordenada del sistema de coordenadas rectangular

### Símbolos griegos

$\rho$	Densidad ( $kg/m^3$ )
$\alpha$	Difusividad térmica ( $m^2/s$ )
$\beta$	Coefficiente de expansión cúbica ( $1/K$ )
$\Delta$	Diferencial
$\mu$	Viscosidad absoluta (Pa s)

### Superíndices y subíndices

$a, m, \infty$	Medio fluido
$0, in$	Inicial

*s, sup* Superficial

### Números adimensionales

$$Gr = \frac{D^3 g \beta \rho^2 \Delta T}{\mu^2} \quad \text{Número de Grashof}$$

$$Nu = \frac{h D}{k} \quad \text{Número de Nusselt}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\kappa} \quad \text{Número de Prandtl}$$

$$Re = \frac{D v \rho}{\mu} \quad \text{Número de Reynolds}$$

# 1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día la necesidad de la industria alimentaria de maximizar la eficiencia de los procesos térmicos (escaldado, cocción, pasteurización, esterilización, entre otros) para optimizar la calidad del producto final, ha impulsado un creciente interés en la aplicación de modelos computacionales capaces de simular el fenómeno de conducción de calor en productos alimenticios sólidos presente en los diversos procesos térmicos.

Los actuales ciclos de diseño de procesos térmicos obligan a los ingenieros a obtener soluciones en un tiempo reducido, por lo que se hace necesaria la obtención de soluciones *aproximadas* que puedan conseguirse fácilmente en un marco de tiempo y esfuerzo razonables.

Los problemas de transferencia de calor por conducción están gobernados por ecuaciones diferenciales sujetos a ciertas condiciones de frontera, y las soluciones de estas ecuaciones proporcionarían una solución aproximada al problema físico particular estudiado. Sin embargo, las complejidades en la geometría, propiedades y condiciones de frontera, que se ven en la mayoría de los productos alimenticios y procesos térmicos, usualmente significan que no se puede obtener una solución sin realizar gruesas simplificaciones del problema físico.

Uno de los métodos numéricos actualmente en uso en el campo de la Ingeniería Aplicada para la obtención de soluciones aproximadas a los problemas reales de transferencia de calor por conducción, es el Método de Elementos Finitos (en inglés *Finite Element Method*, FEM). El Método de

Elementos Finitos es utilizado para aproximar las ecuaciones diferenciales de gobierno de un sistema continuo convirtiéndolo en un sistema discreto. Normalmente, la cantidad de ecuaciones generadas hace imposible una solución manual, haciéndose imprescindible el uso de la tecnología computacional, hardware y software apropiados, para los cálculos. Es aquí que surgió el desarrollo de aplicaciones ingenieriles asistidas por computador, sistemas conocidos con el término CAE (*Computer-Aided Engineering*, Ingeniería Asistida por Computador).

Por otro lado, para el caso de la representación y definición del modelo matemático en 3 dimensiones (3D) así como de la visualización de los resultados, el FEM requiere de interfaces gráficas especiales. Esto no se debe a la naturaleza del modelo, sino a la forma compleja a la cual dichos modelos matemáticos se aplican, sobre todo en dominios irregulares complejos 3D. Es así que desde hace aproximadamente 40 años las tecnologías CAD/CAE (*Computer-Aided Design* y *Computer-Aided Engineering*) se han extendido en su uso, especialmente por la interfaz gráfica y su orientación al usuario. La aplicación de la tecnología CAD/CAE ha sido ampliamente demostrada en otras áreas de la Ingeniería, física, aeroespacial, la industria automotriz, entre otros.

Basándose en los antecedentes citados, el objetivo general de la presente tesis fue:

- Modelar y simular el proceso de conducción de calor en alimentos, isotrópicos, considerando formas irregulares 3D complejas sujetos a condiciones de borde involucrando asimetría geométrica.

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

#### Hipótesis:

- Mediante la aplicación de la tecnología CAD y CAE, el primero basado en modelos geométricos NURBS y el segundo en el método de elementos finitos (FEM), es posible simular procesos de conducción de calor sin cambio de fase de alimentos de formas irregulares 3D complejas con respecto a la temperatura y tiempo.

#### Objetivos específicos:

- Capturar la forma real irregular compleja de los alimentos seleccionados mediante digitalización 3D.
- Simular, utilizando el Método de Elementos Finitos, procesos de conducción de calor de los dominios digitalizados considerando condiciones de isotropía y condiciones de borde constantes.
- Comparar los resultados experimentales con los simulados considerando las condiciones típicas de hidrocalentamiento e hidrogenfriamiento. Los alimentos considerados fueron turiones de espárragos verdes, floretes de brócoli, y camarones (gambas).

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Modelo matemático

**2.1.1 Ecuaciones de gobierno.** La ecuación tridimensional no lineal para la conducción de calor transiente en un material anisotrópico y no homogéneo, con propiedades termofísicas dependientes de la temperatura y orientación, puede ser descrita por la siguiente ecuación diferencial, que en este caso está expresada en coordenadas rectangulares (CARSLAW & JAEGER, 1959; MYERS, 1971; SEGERLIND, 1984; ÖSIZIK, 1994; BATHE, 1996):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

Es necesario mencionar que en parte de la literatura especializada los modelos anisotrópicos son referidos como modelos ortotrópicos. De hecho, la ortotropía es un caso de anisotropía en donde se puede encontrar uno o más planos de simetría (BOWER, 1999; ALGOR, 2003).

Para el caso de considerar anisotropía (ortotropía) con propiedades termofísicas constantes con respecto a la temperatura, se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

Para el caso particular de un sólido homogéneo e isotrópico ( $k = k_x = k_y = k_z$ ), con propiedades dependientes de la temperatura se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

La ecuación anterior para un producto isotrópico se simplifica como sigue considerando propiedades constantes con respecto a la temperatura:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

Siendo  $\alpha = k/\rho C_p$  la difusividad térmica del producto;  $\rho$  = densidad;  $C_p$ =calor específico;  $k$  = conductividad térmica.

**2.1.2 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 (MYERS, 1971; ÖZISIK, 1977; CLELAND y EARLE, 1984).

**a) Condición de primera clase.** Este caso establece una temperatura superficial ( $T_s$ ) fija igual a la temperatura del medio ( $T_m$ ), esto es:

$$T_s = T_m \quad \text{para todo } x,y,z \text{ sobre la superficie límite } S, \quad t > 0 \quad (2.5)$$

**b) Condición de segunda clase.** Establece un flujo de calor fija a o desde la superficie, según sea el caso, calentamiento o enfriamiento.

$$q = -kA \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad \text{para todo } x,y,z \text{ sobre la superficie límite } S, \quad t > 0 \quad (2.6)$$

**c) Condición de tercera clase.** Conocida también como la Ley de Newton del Enfriamiento, establece una condición de transferencia de calor por convección entre la superficie del objeto y el medio circundante. Esta condición límite se define de la siguiente forma:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = h [T_m - T_S]_{x, y, z \text{ sobre la superficie límite } S} \quad ; \quad t > 0 \quad (2.7)$$

**d) Condición límite de Simetría.** La cual es aplicable en los casos de una superficie perfectamente aislada o sobre un eje de simetría:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(0, 0, 0, t) = 0 \quad \text{sobre el centro geométrico} \quad ; \quad t > 0 \quad (2.8)$$

De las condiciones de frontera citadas, la segunda y cuarta clase tienen aplicaciones poco prácticas. La primera clase puede tratarse como un caso especial de la tercera clase con  $h \approx \infty$ ; y, el caso de simetría puede considerarse como la condición límite de tercera clase con  $h \approx 0$ . Por lo tanto, la **condición de frontera de tercera clase** es de lejos la más importante en la práctica. Esta condición es aplicable a diversas situaciones prácticas industriales donde un producto es enfriado o calentado por convección pura, como son los casos del hidrocalentamiento e hidroenfriamiento de alimentos.

**2.1.3 Condiciones iniciales.** La condición inicial para un proceso de calentamiento o enfriamiento define la distribución de temperaturas en el objeto antes de iniciar el proceso. Existen dos posibilidades que se detallan a continuación.

La primera establece una condición inicial uniforme, la cual indica una temperatura uniforme en todos los puntos del objeto, como sigue:

$$T(x, y, z, 0) = T_{in} \quad ; \quad \text{para todo } x, y, z, \quad t = 0 \quad (2.9)$$

La segunda establece una condición inicial no uniforme, la cual indica que la temperatura depende de la posición en el interior del objeto. Matemáticamente se define como:

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \quad ; \text{ para todo } x, y, z, \quad t = 0 \quad (2.10)$$

**2.1.4 Parámetros involucrados en la velocidad de transferencia de calor.** La velocidad de transferencia de calor esta determinada en el interior del objeto por sus propiedades termofísicas, y en el exterior por las características de medio circundante, temperatura y velocidad del fluido que tendrá efecto directo en la magnitud del coeficiente convectivo (SINGH y HELDMAN, 1993).

**2.1.4.1 Propiedades termofísicas.** Las propiedades termofísicas son dependientes de la temperatura según sea el alimento en estudio, lo que provoca una efecto directo en la velocidad de penetración de calor dentro de él. Por lo anterior para lograr un estudio exitoso de la transferencia de calor en estado transiente, su identificación y magnitud serán muy importantes así como la forma en la cual se expresan. CHOI y OKOS (1986) desarrollaron correlaciones matemáticas para calcular las propiedades termofísicas a partir de la composición proximal y temperatura.

**2.1.4.1.1 Conductividad térmica ( $k$ ).** La conductividad térmica de un producto no es constante y depende de la temperatura. Hay una estrecha relación entre el contenido de agua y esta propiedad, excepto para aquellos productos vegetales considerablemente menos densos que el agua (SWEAT, 1974). Sin embargo, cuando el rango de temperatura es limitado, esta dependencia puede ser despreciada, y 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).

**2.1.4.1.2 Densidad ( $\rho$ ).** El comportamiento de la densidad de un alimento se ve afectada directamente por la temperatura, ya que ella produce una disminución en los valores de densidad a medida que su magnitud es mayor (LEWIS, 1990). La densidad por otra parte guarda directa relación con su contenido de agua, por definirse como la masa de partículas dividida por su volumen, lo cual nos señala que cualquier variación en el contenido de agua provocará un efecto en su magnitud.

**2.1.4.1.3 Calor específico ( $C_p$ ).** 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 específico de un material establece la capacidad de absorber o remover calor, según sea calentamiento o enfriamiento, respectivamente (SCHNEIDER, 1957).

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

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.11)$$

Al igual que las propiedades mencionadas anteriormente, la difusividad térmica juega un rol importantísimo en el diseño y análisis de procesos de alimentos e incluso en el diseño de los equipos utilizados en ellos.

El significado físico de esta propiedad es determinada como la habilidad que posee el material para conducir el calor a moléculas adyacentes (SINGH, 1982), y su expresión matemática guarda relación directa con las tres propiedades mencionadas anteriormente.

En productos no homogéneos el valor de la difusividad térmica puede variar según la posición, por la sencilla razón de que las otras tres variables involucradas no podrían ser consideradas constantes. SINGH (1982) establece que el efecto que produce el agua y la temperatura sobre el valor de la difusividad térmica es tal que deben ser considerados al momento de comenzar a establecer una metodología para su cálculo. En estudios realizados por CHOI y OKOS (1986) se guarda esta relación (contenido de agua y temperatura), para establecer los modelos propuestos para predecir estas propiedades termofísicas.

**2.1.4.2 Coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h$ ).** El coeficiente convectivo es uno de los parámetros más importantes a ser determinado para lograr establecer cuantitativamente un proceso de transferencia de calor transiente. BIRD **et al.** (1960), señala que el sistema en el cual está inmerso el objeto se relaciona directamente con el coeficiente convectivo, en lo que respecta a su geometría, velocidad de flujo, magnitud de la diferencia de temperatura que existe entre el producto y el medio circundante, así como de la distribución superficial de la temperatura.

El coeficiente convectivo representa la resistencia a la transferencia de calor entre el fluido de calentamiento o enfriamiento y la superficie de un producto inmerso en él. Por ello, controla la velocidad de intercambio de calor entre el medio y el producto. Representa el factor proporcional entre el calor transferido por convección hacia el cuerpo inmerso en el líquido y la diferencia de

temperatura entre la superficie de éste y el fluido. Su magnitud está definida por el grosor de la capa límite. Al disminuir esta capa, aumentará el valor del coeficiente convectivo ( $h$ ) y mejorará la velocidad de transferencia de calor. La disminución de esta capa se logra al aumentar la velocidad del fluido por sobre el objeto en tratamiento. Este aumento se denomina convección forzada en el cual los valores de  $h$  están muy por sobre los obtenidos por una convección natural (SINGH y HELDMAN, 1984; CHANG y TOLEDO, 1998). En el CUADRO 1 se muestran algunos rangos del valor del coeficiente  $h$  para diferentes condiciones de flujo.

**CUADRO 1. Valores aproximados del coeficiente convectivo de transferencia de calor**

Fluido	Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K)
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 (1984).

El valor del coeficiente convectivo es influenciado por la magnitud de las variables que están involucradas en un proceso de transferencia de calor, tales como la velocidad de flujo, el tamaño del objeto, y las propiedades del objeto y del fluido (LENZ y LUND, 1973; MAESMAN *et al.*, 1992).

**2.1.4.2.1 Números adimensionales.** Los siguientes números adimensionales han sido identificados y utilizados en correlaciones para

determinar el coeficiente  $h$  en problemas de transferencia de calor por convección (GEANKOPLIS, 1978; SINGH y HELDMAN, 1984; TOLEDO, 1991):

**a) Número de Nusselt ( $Nu$ )**, que involucra el coeficiente convectivo ( $h$ ), la dimensión característica del cuerpo ( $D$ ) y la conductividad térmica del fluido ( $k$ ). Esta expresión adimensional puede considerarse como la razón de la dimensión característica del sistema y el grosor de la capa límite del fluido, la cual transmitirá calor por conducción en la misma razón que la calculada usando el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

$$Nu = \frac{h D}{k} = \frac{\text{dimensión característica}}{\text{grosor de capa límite}} \quad (2.12)$$

**b) Número de Reynolds ( $Re$ )**, que involucra la dimensión característica del sistema ( $D$ ), la velocidad del fluido ( $v$ ), la densidad ( $\rho$ ) y la viscosidad ( $\mu$ ) del fluido. Puede ser considerado como una razón que relaciona las fuerzas de inercia o cinéticas ( $\rho v^2$ ) con las fuerzas de la corriente fluida ( $\mu v/D$ ).

$$Re = \frac{D v \rho}{\mu} = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas viscosas}} \quad (2.13)$$

**c) Número de Prandtl ( $Pr$ )**, que involucra el calor específico ( $C_p$ ), la viscosidad ( $\mu$ ) y la conductividad térmica ( $k$ ) del fluido. Puede considerarse como la razón que relaciona el componente cortante de la difusividad de ímpetu ( $\mu/\rho$ ), a la difusividad de calor ( $k/\rho C_p$ ) y correlaciona físicamente el espesor relativo de la capa límite hidrodinámica con el de la capa límite térmica.

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\kappa} = \frac{\text{difusividad de ímpetu}}{\text{difusividad de calor}} \quad (2.14)$$

**d) Número de Grashof ( $Gr$ ),** que relaciona la dimensión característica del sistema ( $D$ ), la aceleración de gravedad ( $g$ ), el coeficiente de expansión térmica ( $\beta$ ), la densidad ( $\rho$ ) y la viscosidad absoluta ( $\mu$ ) del fluido, y la diferencia de temperaturas ( $\Delta T$ ) entre la superficie y la temperatura del fluido al otro lado de la capa límite. Este número puede ser considerado como la razón de las fuerzas de gravedad y las fuerzas viscosas, producto del cambio de temperaturas en el fluido. Este número se utiliza en la convección natural y su papel es similar al número de Reynolds en la convección forzada.

$$Gr = \frac{D^3 g \beta \rho^2 \Delta T}{\mu^2} = \frac{\text{fuerzas de gravedad}}{\text{fuerzas viscosas}} \quad (2.15)$$

**2.1.4.2.2 Relaciones adimensionales.** Los números adimensionales anteriormente descritos se relacionan de diferentes formas entre sí, dependiendo si la transferencia de calor se presenta como convección natural o forzada.

**a) Convección natural.** En la convección natural, el movimiento del fluido se debe a la diferencia de densidades entre el fluido caliente con respecto al frío. Por ello existen fuerzas de gravedad y flotación, las cuales van marcando el patrón de flujo en el sistema. Este tipo de convección está representada por relaciones adimensionales de la siguiente forma:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (2.16)$$

**b) Convección forzada.** En la convección forzada, el movimiento del fluido se debe a sistemas externos como bombas o ventiladores. El patrón de flujo que presente el fluido va a depender de la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas. Este tipo de convección está representada por relaciones adimensionales de la siguiente forma:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.17)$$

**c) Convección natural y forzada combinadas.** En los problemas de transferencia de calor por convección forzada, algo de convección natural toma lugar; pero cuando el campo de velocidad externa es dominante, los efectos de la convección natural son despreciables. Inversamente, si los campos de velocidad generados por los efectos de flotación son dominantes, los efectos de convección forzada, si los hay, son despreciables y el problema es tratado como convección puramente natural. Existen también numerosas situaciones prácticas en las cuales la convección forzada y la natural son del mismo orden de magnitud y ninguna de ellas puede ser despreciada. Estos casos se dan cuando la velocidad de flujo es baja, lo que permite que subsistan los dos tipos de convección. Las relaciones adimensionales son de la siguiente forma:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr) \quad (2.18)$$

Los grupos adimensionales que aparecen en esta ecuación representan la razón entre las fuerzas de flotación y las de inercia. Cuando esta razón es del orden de la unidad, esto es  $Gr \cong Re^2$ , la convección natural no puede ser ignorada en comparación con la convección forzada, y éstas deben analizarse simultáneamente. Sin embargo, cuando esta relación es menor que la unidad, la convección forzada predomina, pudiéndose despreciar la convección natural (ÖZISIK, 1977).

**2.1.4.2.3 Ecuaciones adimensionales.** Los números adimensionales mencionadas anteriormente toman forma de ecuaciones que han sido propuestas por diversos autores en la literatura especializada. Sin embargo, DÍAZ (2000) determinó experimentalmente que no todas esas ecuaciones constituyen modelos adecuados para el cálculo del número de Nusselt y del coeficiente convectivo de transferencia de calor, en procesos de

hidrocalentamiento e hidrogenfriamiento de alimentos, aunque cumplen las restricciones impuestas por los números adimensionales de Reynolds, Grashof y/o Prandtl, lo cual está relacionado con la diferencia entre los métodos y condiciones experimentales que no siempre se ajustan a las condiciones operacionales involucradas en los procesos de alimentos.

Las ecuaciones adimensionales obtenidas por DÍAZ (2000) para geometrías cilíndricas y esféricas bajo régimen de convección natural en procesos de calentamiento y enfriamiento se presentan a continuación:

a) Para el caso de **cilindros** bajo convección natural:

Para el calentamiento:

$$Nu = 0,5512 (Gr Pr)^{0,2421} ; 733993 < Gr Pr < 44760255 ; r^2 = 0,91118362 \quad (2.19)$$

Para el enfriamiento:

$$Nu = 0,2544 (Gr Pr)^{0,2743} ; 1842123 < Gr Pr < 28049445 ; r^2 = 0,69613650 \quad (2.20)$$

Para el proceso global:

$$Nu = 0,6731 (Gr Pr)^{0,2222} ; 255233 < Gr Pr < 54161572 ; r^2 = 0,65710962 \quad (2.21)$$

b) Para el caso de **esferas** bajo convección natural:

Para el calentamiento:

$$Nu = 1,8925 (Gr Pr)^{0,1778} ; 733993 < Gr Pr < 65681725 ; r^2 = 0,88692422 \quad (2.22)$$

Para el enfriamiento:

$$Nu = 0,6744 (Gr Pr)^{0,2231} ; 1842122 < Gr Pr < 6732148 ; r^2 = 0,68552317 \quad (2.23)$$

Para el proceso global:

$$Nu = 1,9985 (Gr Pr)^{0,1664} ; 255229 < Gr Pr < 79477328 ; r^2 = 0,54825976 \quad (2.24)$$

## 2.2 Simulación de procesos

Como se vio en la sección anterior, una representación matemática del proceso físico es desarrollada en términos de un conjunto de ecuaciones llamadas *ecuaciones de gobierno, condición inicial y condiciones de frontera*. Las ecuaciones de gobierno son simplemente expresiones de conservación de energía. Los *software* CAE típicamente pueden resolver un conjunto muy general de ecuaciones de gobierno, condición inicial y condiciones de frontera para cubrir un amplio rango de procesos. Estos conjuntos de ecuaciones son bastante extensos y varían de un *software* a otro.

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería industrial, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que hace su entendimiento más simple. Esta simulación es en algunos casos casi indispensable, y en otros casos no lo es tanto, pero sin este procedimiento su entendimiento se hace más complicado (ALFARO, 2003).

La simulación es la representación de un proceso o fenómeno mediante otro más simple, que permite analizar sus características. La simulación, hoy en día, puede encontrarse en la producción de prototipos de textiles, alimentos, juguetes, en la construcción de infraestructuras por medio de maquetas, hasta en el entrenamiento virtual de los pilotos de combate.

Las grandes demandas del mercado han obligado en los últimos años a implantar en las empresas todas aquellas tecnologías que puedan hacer realidad los tres grandes objetivos del diseño moderno (ALFARO, 2003):

- Diseñar para conseguir una fabricación a un costo competitivo.
- Diseñar en orden la utilización real en servicio.
- Diseñar bien al primer intento.

En este sentido la introducción del CAD está ya representando un gran avance en la etapa del diseño conceptual de nuevos productos. Por el contrario, el CAE se encuentra en una etapa mucho más primaria. Sin embargo la verdadera reducción del bucle diseño-desarrollo se produce cuando ambas técnicas actúan conjuntamente (CAD/CAE). La primera para definir el producto y la segunda para simular su comportamiento en las condiciones de servicio. Sólo la conjunción de ambas técnicas haría posible alcanzar los tres objetivos antes mencionados (ALFARO, 2003).

La gran evolución de los métodos informáticos tanto en su aspecto de hardware como software, ha permitido afrontar la resolución de complejos físicos matemáticos cuya resolución analítica resultaría prácticamente imposible. De hecho muchos de dichos problemas hace ya años que están planteados, sólo falta un medio adecuado para la obtención de resultados prácticos. Así pues la simulación intenta reproducir la realidad a partir de una resolución numérica mediante un ordenador, de las ecuaciones matemáticas que describen dicha realidad. Por lo tanto hay que asumir que la simulación es tan exacta como sean las ecuaciones de partida y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización.

Mediante la simulación numérica es posible generar sólidos de aspecto casi real, comprobar su comportamiento bajo diversas condiciones de trabajo, estudiar el movimiento conjunto de grupos de sólidos, etc. Esto permite un *conocimiento mucho más profundo de un producto antes de que exista físicamente*, siendo posible *detectar* muchos de los *problemas* que de otro modo se hubieran detectado en el servicio real.

La simulación, además, puede ayudar a resolver asuntos relacionados con el diseño de nuevos sistemas o modificación de los existentes. Esto se fundamenta en que las inversiones o su modificación son costosas y, a través

de la simulación, se puede experimentar qué beneficios trae la implementación de estos cambios a un costo mucho más bajo.

Los resultados que se pueden obtener mediante una simulación de procesos pueden ser:

- Decisiones de inversión en equipos.
- Reducción de costos.
- Reducción de inventarios y *WIP (wait in process)*
- Mejorar la programación de tareas.
- Identificar cuellos de botellas del sistema y posibles restricciones.
- Determinar el personal necesario de acuerdo a los niveles de demanda.

Mediante la simulación de procesos es posible experimentar soluciones alternativas y reglas de decisión, de manera de hacer predicciones del sistema.

**2.2.1 Diseño Asistido por Computador (CAD).** El término CAD es el acrónimo del inglés *Computer-Aided Design*, Diseño Asistido por Computador. Se refiere al uso de computadores para diseñar cosas. Un sistema CAD es una combinación de *hardware* y *software* que permite a ingenieros y arquitectos diseñar todo desde muebles hasta aviones. Los software CAD (como AutoCAD) generalmente consumen muchos recursos, requiriendo procesadores rápidos, mucha memoria y un monitor grande y claro para conseguir mejores resultados. El CAD ha permitido a la gente fácilmente modelar, crear y recorrer o ver diseños de objetos 3D desde diferentes ángulos en un computador sin siquiera tomarse el tiempo de fabricar un prototipo físico. Es una gran herramienta que ahorra tiempo y ha revolucionado el diseño en general.

**2.2.1.1 Modelo geométrico.** El modelado geométrico consiste en crear un diseño en el computador, es decir, una descripción de la geometría del objeto.

Esta representación permite manipular y visualizar la imagen del objeto en el computador a través de órdenes mediante teclado y/o mouse.

Hay cuatro métodos de representar o modelar la geometría del objeto: alámbrico (*Wireframe*), superficies, sólido y geometría paramétrica. La forma más básica es el modo alambre que representa los bordes internos y externos del objeto conectados mediante líneas rectas y curvas, que también se le conoce como Método B-rep (*Boundary representation*). Las superficies definen la forma interna y externa del modelo, mientras que el sólido representa el volumen del objeto. La geometría paramétrica utiliza ecuaciones definidas por el usuario para cambiar la geometría asociada (MOLERO, 2001).

En el campo de la Ingeniería en alimentos el CAD es usado en muchas áreas, como diseño de envases, diseño de equipos y diseño de productos con diversas formas no tradicionales.

**2.2.1.1.1 Geometrías regulares, irregulares y complejas.** Un cuerpo geométrico se define como una figura geométrica tridimensional, es decir, que se proyecta en tres dimensiones: largo, ancho y alto. Debido a esta característica existe en el espacio pero se halla limitado por una o varias superficies. También se le denomina sólido.

Los diferentes sólidos se pueden clasificar en poliedros y cuerpos redondos (PÉREZ, 2004):

a) Poliedros: son aquellos que tienen todas sus caras planas. Se clasifican en regulares e irregulares:

- Regulares: son aquellos cuyas caras son polígonos regulares y todas son iguales. Estos son:

Tetraedro; 4 caras en forma de triángulo equilátero.

Hexaedro; 6 caras en forma de cuadrado (cubo)

Octaedro; 8 caras en forma de triángulo equilátero.

Dodecaedro: doce caras en forma de pentágono

Icosaedro; 20 caras en forma de triángulo equilátero.

- Irregulares: Son aquellas cuyas bases son polígonos diferentes a las caras laterales. Estos son los prismas y las pirámides.

b) Cuerpos redondos: Son los cuerpos limitados, parcial o totalmente, por superficies curvas. Se tienen cilindros, esfera y cono.

Como podemos ver en la naturaleza no siempre encontramos estos tipos de formas geométricas; los objetos del mundo real no presentan una regularidad en su forma, es decir, no están constituidos por caras planas, ni presentan ejes de simetría, sino que presentan una irregularidad estructural que tiene que ver con su estructura orgánica, es decir, forman un elemento integral de un todo con coordinación sistemática de sus partes, teniendo las características de un organismo, desarrollándose en la forma de una planta o animal viviente. Estos objetos “orgánicos” presentan entonces una irregularidad y asimetría que lo hacen ser complejos y no calzan en las definiciones comunes de geometrías regulares o irregulares.

**2.2.1.1.2 Ingeniería reversa.** Hasta este punto se ha hablado de “diseño” en 3D, es decir, la creación de un modelo en el computador. Pero, ¿qué pasa si se quiere obtener un modelo que reproduzca con exactitud la complejidad de un objeto orgánico del mundo real? El CAD, como “diseño”, muchas veces no es la solución más adecuada en estos casos, pues el diseño de objetos “reales” es de alta complejidad y toma gran cantidad de tiempo y muchas veces el modelo digital no reproduce fielmente el modelo físico. Es por esto que actualmente se

ha recurrido a la obtención de manera digital de la forma física exacta de un objeto, mediante la llamada Ingeniería Reversa.

Para comprender el término de ingeniería reversa consideraremos que mientras la ingeniería convencional transforma conceptos y modelos en partes reales, la ingeniería reversa es aquella disciplina que toma esas partes reales y las transforma en conceptos y modelos (VÁRADY *et al.*, 1997).

Esta metodología realiza el análisis de un objeto, cuya superficie puede deducirse en un modelo digital idéntico mediante la tecnología CAD y el uso del computador, viéndose aumentada la eficiencia, calidad de diseño, fabricación y análisis del objeto a ser estudiado (BORDEGONI y FILIPPI, 2001).

Por consiguiente, la finalidad de esta metodología es producir una copia íntegra o de sólo una parte del objeto, cuando no hay disponible modelos o documentación que se ajusten de manera exacta a los requerimientos que se necesiten, o cuando se vea imposibilitado el obtener de manera precisa una copia del objeto existente cuando es necesario realizar un análisis o alguna modificación para su estudio o evaluación (RAZDAN *et al.*, 1998).

El procedimiento de Ingeniería reversa se puede caracterizar por 4 pasos: (VÁRADY *et al.*, 1997), los cuales son captura de datos, preprocesamiento, segmentación y adecuación de superficie, y creación del modelo CAD.

**a) *Captura de datos:*** se realiza mediante la interacción con la superficie o volumen del objeto en estudio, y para ello existen métodos sin contacto (ópticos, acústicos y magnéticos) y métodos táctiles o de contacto. En estos últimos, utilizados en la presente investigación, la superficie del objeto es tocada usando sondas mecánicas en el extremo de un brazo robótico (FIGURA 1). Las partes sensibles en las articulaciones del brazo determinan la ubicación

de la coordenada relativa. Este método es ideal para superficies pequeñas e irregulares (VÁRADY *et al.*, 1997).



**FIGURA 1. Brazo robótico digitalizador.**

**b) *Preprocesamiento:*** Este procedimiento entrega como resultado una conexión de puntos que conforman un conjunto de datos, resultando una unión entre estos puntos cercanos de manera tal que constituyan una estructura ordenada para el establecimiento de la superficie como tal (LI *et al.*, 2002).

**c) *Segmentación y adecuación de superficie:*** una vez ordenado el conjunto de puntos se procede a una segmentación que los divide en subconjuntos donde cada subdivisión incluye aquellos puntos que contienen los datos que forman la superficie en particular, procediendo a clasificarlos y decidir qué tipo de superficie corresponde a cada subdivisión, por ejemplo una plana, cilíndrica, etc., para luego adecuar la mejor superficie que se ajuste a todos aquellos puntos dados por cada subconjunto.

**d) *Creación del modelo CAD:*** Una vez finalizadas las etapas anteriores, se obtiene el modelo digital tridimensional, que corresponde a una superficie

denotada por todos aquellos puntos o conjunto de datos capturados, la cual permite realizar los análisis programados o los objetivos estimados con su creación.

Una vez obtenido el modelo digital final, es posible realizarle análisis y actualizaciones, lo cual permite una mayor flexibilidad, ya que dicho modelo se puede mantener en espera hasta que sea necesaria su utilización en análisis posteriores (STEINBERG *et al.*, 1998).

**2.2.1.1.3 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines).** NURBS es el acrónimo de *Non-Uniform Rational B-Splines* (B-Splines Racionales No Uniformes). Las NURBS son representaciones matemáticas de geometría en 3D capaces de describir cualquier forma con precisión, desde simples líneas en 2D, círculos, arcos o curvas, hasta los más complejos sólidos o superficies orgánicas de formas libres en 3D. Gracias a su flexibilidad y exactitud las NURBS se utilizan extensivamente en la industria del CAD y más extensamente en computación para la generación de geometrías 3D. Los modelos NURBS pueden usarse en cualquier proceso, desde la ilustración y animación hasta la fabricación (RHINOCEROS, 2002).

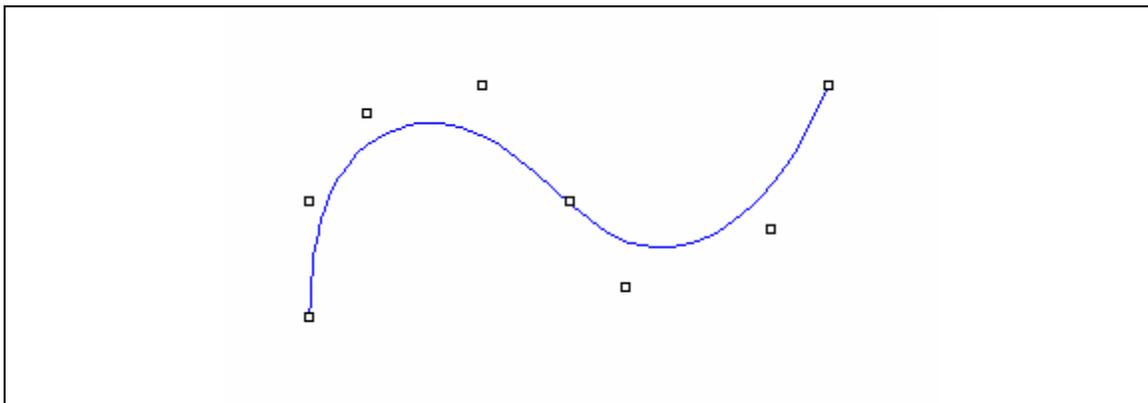
Una curva NURBS se define mediante tres elementos: puntos de control, grados y nodos:

- **Puntos de control:** es una lista de puntos que controlan la geometría de la curva NURBS. Excepto por los puntos extremos de una curva (o punto final, si es una curva cerrada), esos puntos de control están alejados de la curva (FIGURA 2). Actúan como imanes atrayendo a la curva hacia sí mismos, y cuando uno de ellos es movido, la curva cambia para acomodarse a la nueva localización del punto de control. Inicialmente todos los puntos de control tienen el mismo poder, o **peso** como se lo denomina usualmente, para controlar la

forma de una curva. Cuando una curva tiene puntos de control con pesos desiguales, se denomina curva **Racional**. Rara vez se necesitan puntos de control con pesos desiguales cuando se realizan curvas de forma libre, pero son necesarios para hacer curvas de secciones cónico-circulares, elipses, parábolas, y demás (WILSON, 2001).

- **Grado:** se refiere al grado del polinomio usado para crear la curva y determina la fuerza con la que el punto de control atrae a la curva. A menor grado la función base atrae más a la curva hacia los puntos de control (WILSON, 2001).
- **Nodos:** Cada función base afecta sólo a la sección de la curva próxima al punto de control, y los extremos de dichos segmentos se denominan **nodos**. El NU en NURBS significa no-uniforme, y se refiere al espaciado desigual de nodos (WILSON, 2001).

Si se cambia cualquiera de estos factores, cambia la forma de la curva (RHINOCEROS, 2002).



**FIGURA 2. Curva NURBS (azul) con sus puntos de control (negro).**

Las principales razones de la amplia aceptación y popularidad de las NURBS son las siguientes:

- Ofrecen una forma común matemática para representar y diseñar formas y superficies.
- Al poder manipular los puntos de control, ellas ofrecen flexibilidad para diseñar una amplia variedad de formas.
- Su evaluación es rápida y computacionalmente estable.
- Dan interpretaciones geométricas limpias, siendo esto muy útil para evaluar y diseñar, debido a un excelente conocimiento de la geometría, especialmente de la geometría descriptiva.
- Sirven como un poderoso conjunto de herramientas para diseñar, analizar, procesar y evaluar objetos.

**2.2.2 Intercambio de Datos CAD/CAE.** Hasta antes de los años 80 los usuarios se encontraban abrumados por la imposibilidad de compartir datos de un sistema CAD (de diseño) a un CAM (fabricación) ó CAE (ingeniería). Se hizo así evidente la necesidad de intercambio de datos que posibilitaran la integración y automatización CAD/CAM/CAE.

En el desarrollo de formatos de intercambio se han preocupado varias organizaciones internacionales, como **ISO** (International Standards Organization), **ANSI** (American National Standards Institute) y **DIN** (Deutsches Institut für Normung).

En la actualidad existen numerosos formatos de intercambio de datos, algunos de ellos son normas internacionales y otros son normas nacionales. Así, nos encontramos con formatos orientados a diseño tales como IGES, VDA, SET; formatos orientados a fabricación, como APT, CLDATA, código ISO, etc; formatos orientados a inspección, como DEAPL, DMIS, NDF, etc. (BARREIRO et al., 1999).

Uno de los formatos de intercambio más difundidos es el IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*). Fue el primer estándar de intercambio de datos de producto, entre diferentes sistemas de CAD/CAM y fue desarrollado con dos propósitos:

- Transferencia de datos de modelos geométricos entre diferentes sistemas CAD/CAM
- Comunicaciones de las empresas con proveedores y clientes

La unidad fundamental de datos en el archivo IGES es la *entidad*. Las entidades están categorizadas como geométricas (curvas, superficies, sólidos) y no-geométricas (vistas, dibujos, anotaciones (cotas, texto) y estructuras (entidades compuestas, macros)) (SMITH **et al.**, 1988).

Con el objetivo de permitir el intercambio de cualquier tipo de información relacionada con un producto se creó la norma ISO 10303 – STEP (1994) (*Standard for the Exchange of Product Model Data*). STEP es una norma desarrollada por ISO que proporciona un método de modelado e intercambio para toda la información generada sobre un producto durante su ciclo de vida. Puede contemplar por tanto la información relativa a su diseño, análisis, fabricación, inspección, montaje, mantenimiento, etc. Aunque el desarrollo de esta norma se inició en 1984, todavía quedan muchos aspectos por definir e implantar. Los trabajos realizados hasta la fecha se han orientado fundamentalmente hacia la fase de diseño (sistemas CAD), aunque ya se está trabajando también en su aplicación en otras áreas (PDM, CAPP, CAM, etc) (BARREIRO **et al.**, 1999)

En la actualidad, los paquetes de software incluyen herramientas que posibilitan el intercambio de datos desde un software CAD a uno CAE, sin necesidad de exportar el archivo en un formato universal, sino que los archivos CAD en su forma nativa pueden ser abiertos directamente en los software CAE de análisis,

asegurando de esta forma la integridad de los datos del modelo que a veces se sacrifica cuando se traduce la geometría a formatos universales como IGES o ACIS.

**2.2.3 Ingeniería Asistida por Computador (CAE).** CAE es el acrónimo en inglés de *Computer-Aided Engineering*, Ingeniería Asistida por Computador. El CAE es un sistema que permite a los ingenieros analizar y *simular* en un computador los modelos que se piensan poner en práctica con el objetivo de apreciar su validez sin incurrir en costos de fabricación. Esto es muy importante, ya que una simulación ahorra muchos costos, tanto en dinero como en tiempo, que significa construir prototipos físicos y realizar pruebas de laboratorio y planta piloto. Es necesario mencionar que en una etapa final un modelo debe ser siempre validado experimentalmente con un prototipo físico llevado a condiciones reales.

Con la ayuda de un *software* adecuado se pueden llevar a cabo diferentes tipos de análisis de ingeniería, tales como análisis de transferencia de calor, análisis estructural, análisis de circuitos electrónicos, etc. (FOODDIGICAE LAB, 2003)

El CAE se define como una herramienta que combina información geométrica (dibujos orientados a la ingeniería) con información funcional (cálculos matemáticos) para realizar análisis de ingeniería. Las herramientas CAE ayudan al ingeniero a analizar, optimizar, y documentar diseños de productos. Incluyen análisis de tensiones, de frecuencias, térmicos, cinemáticos, y otras opciones de análisis.

### **2.3 Método de Elementos Finitos (FEM, Finite Element Method)**

Muchos de los fenómenos que suceden en la naturaleza y en la vida cotidiana pueden ser descritos mediante modelos matemáticos. La complejidad de dicho

modelo depende del fenómeno que se desea describir. Algunos de estos modelos se pueden escribir en términos de ecuaciones diferenciales parciales, y en la gran mayoría la solución exacta a estas ecuaciones no existe hasta nuestros días. La alternativa es usar métodos numéricos para *aproximar* la solución. Dados los avances en la tecnología de los computadores digitales, muchos problemas, cuya solución analítica no se conoce, han podido ser simulados mediante métodos numéricos con bastante precisión (DE LA CRUZ, 2002).

Sistemas físicos **continuos** del mundo real, tales como el flujo de aire alrededor de un avión, la concentración de esfuerzos en una presa, el campo eléctrico en un circuito integrado, la concentración de especies químicas en un reactor, y en nuestro caso, la transferencia de calor, son generalmente modelados matemáticamente usando ecuaciones diferenciales parciales. Para realizar simulaciones en un computador, las ecuaciones necesitan pasar del sistema continuo a un sistema **discreto**, es decir, ser "**discretizadas**" sobre un número finito de puntos del espacio (y tiempo) donde variables como velocidad, densidad, campo eléctrico, temperatura, entre otras, serán calculadas. Los métodos usuales de discretización, como Diferencias Finitas, Volúmenes Finitos y Elementos Finitos, utilizan puntos vecinos para calcular derivadas y de esta manera se tiene el concepto de *malla* sobre la cual se realizan los cálculos (DE LA CRUZ, 2002).

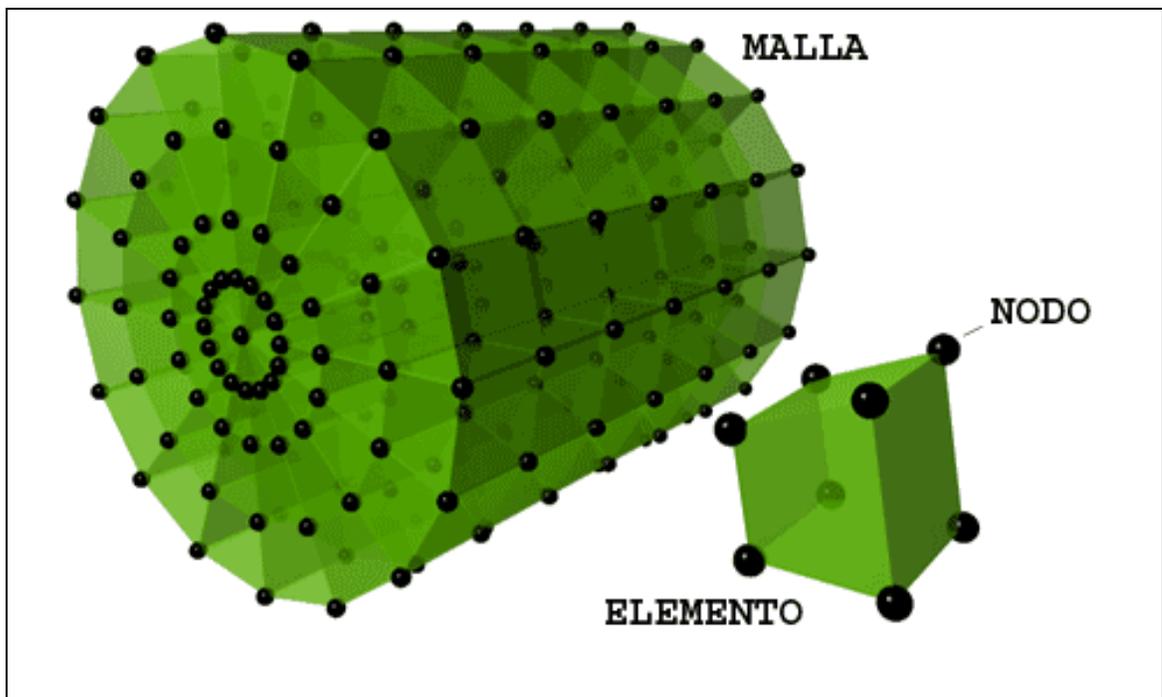
En los métodos numéricos de discretización (diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos), el producto es dividido en pequeños volúmenes de control o elementos. La ecuación de conducción de calor es escrita para cada uno de estos volúmenes o elementos de control, generando un juego de cientos, miles o a veces millones de ecuaciones. Estas ecuaciones son luego resueltas en conjunto para calcular el cambio de la temperatura con el tiempo en cada lugar (PHAM, 2002).

Los primeros ejemplos de discretización los podemos encontrar en la época de la construcción de las pirámides egipcias, en que se utilizaban métodos de discretizado para calcular los volúmenes de las pirámides. Sabios chinos utilizaban polígonos regulares con el fin de realizar aproximaciones a constantes tales como el número  $\pi$ . En Grecia, Arquímedes utilizaba discretizaciones para determinar los volúmenes de todo tipo de sólidos o la superficie de áreas.

El concepto fundamental del Método de Elementos Finitos (FEM, *Finite Element Method*) es que cualquier variable *continua*, como temperatura, presión, o desplazamientos, puede ser aproximada por un modelo *discreto* compuesto por un juego de funciones continuas por trozos, definidas sobre un número finito de subdominios (SEGERLIND, 1976).

El método de los elementos finitos es una de las mas importantes técnicas de simulación y seguramente la mas utilizada en las aplicaciones industriales, y su utilización es extensible a multitud de problemas de física.

El Método de Elementos Finitos de forma sencilla consiste en convertir el sólido en un número finito de partes llamadas **elementos** cuyo comportamiento 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 **mall**a (ALDAYA, 1998). Dicho de otra forma, una región compleja que define un dominio continuo es discretizada en formas geométricas simples llamadas *elementos*. Las propiedades y las relaciones de gobierno son asumidas sobre estos elementos y expresadas matemáticamente en términos de valores desconocidos en puntos específicos en los elementos, llamados *nodos*.



**FIGURA 3. Cilindro con malla y detalle de un elemento con sus nodos.**

Un proceso de *ensamblaje* es usado para conectar los elementos individuales al sistema dado. Cuando se consideran los efectos de las cargas y condiciones de frontera, usualmente se obtiene un juego de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales. La solución a estas ecuaciones da el comportamiento *aproximado* del dominio o sistema continuo. El dominio continuo tiene un número *infinito* de grados de libertad, mientras que el modelo discretizado tiene un número *finito* de éstos. Este es el origen del nombre del Método de Elementos Finitos (BARTON y RAJAN, 2000).

Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada función de *interpolación* (ALFARO, 2003).

Como puede apreciarse de lo dicho, en el método de los elementos finitos son casi esenciales los conceptos de "**Discretización**" o acción de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, y de "**Interpolación**", o acción de aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos. Por lo tanto el MEF. es un método aproximado desde múltiples perspectivas (ALFARO, 2003):

- a) Discretización.
- b) Interpolación.
- c) Utilización de métodos numéricos.

Esta presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución del problema. Los diversos coeficientes del modelo son automáticamente calculados por el computador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. Sin embargo queda en manos del usuario decir hasta que punto la discretización utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura (ALFARO, 2003).

La discretización correcta depende de diversos factores, como son el tipo de información que se desea extraer del modelo o el tipo de sollicitación aplicada.

Actualmente el método de los elementos finitos ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico, capaz de resolver cualquier problema de la física formulable como un sistema de ecuaciones, abarcando los problemas de la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor, del magnetismo, etc. (ALFARO, 2003).

Como el número de ecuaciones generadas usualmente es bastante grande para la mayoría de las aplicaciones del mundo real del FEM, se requiere el poder de cálculo del computador digital. *El Método de Elementos Finitos tiene poco valor práctico si no se dispone de un computador digital.* Los avances y la

disponibilidad de computadores y software han llevado al FEM al alcance de ingenieros de diversas industrias, e incluso estudiantes (BARTON y RAJAN, 2000).

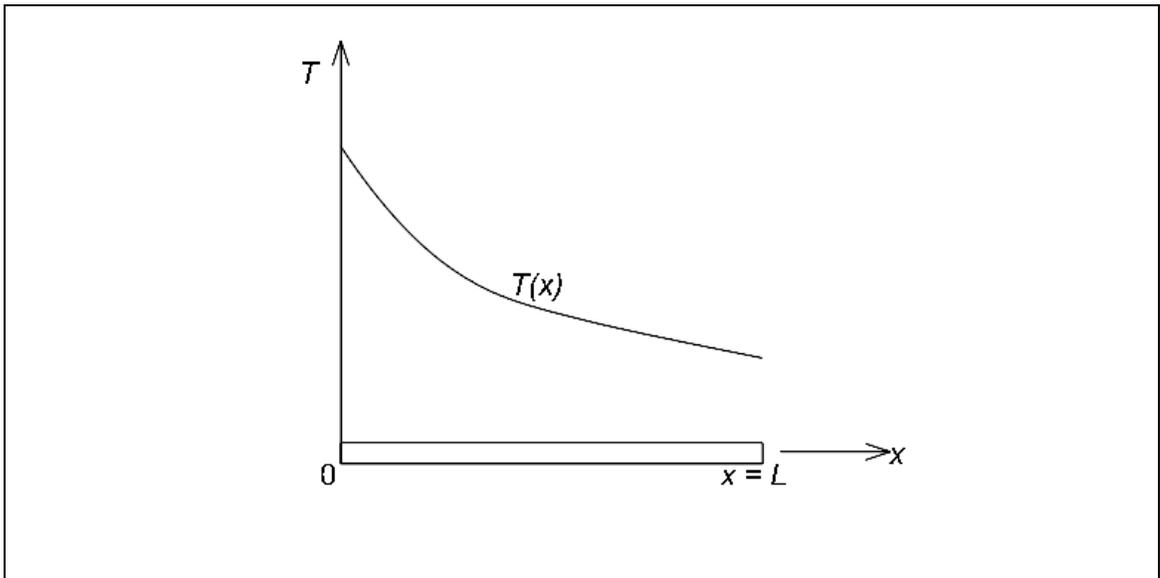
El término "elemento finito" distingue la técnica del uso de "elementos diferenciales" infinitesimales usados en cálculo, ecuaciones diferenciales, y ecuaciones diferenciales parciales. El método también se distingue de las ecuaciones de diferencias finitas, para las cuales aunque los pasos en los que el espacio es dividido son finitos en tamaño, hay poca libertad en las formas que los pasos discretos pueden tomar. El análisis de elementos finitos es una manera de tratar con estructuras que son más complejas que con las que se puede tratar analíticamente usando ecuaciones diferenciales parciales. El FEM trata con fronteras complejas mejor de lo que las ecuaciones de Diferencias Finitas lo harían, y da respuestas a problemas estructurales del "mundo real". El FEM se ha extendido considerablemente en alcance durante los aproximadamente 40 años de su uso (BUDGELL, 1998).

Dos características del FEM merecen ser mencionadas:

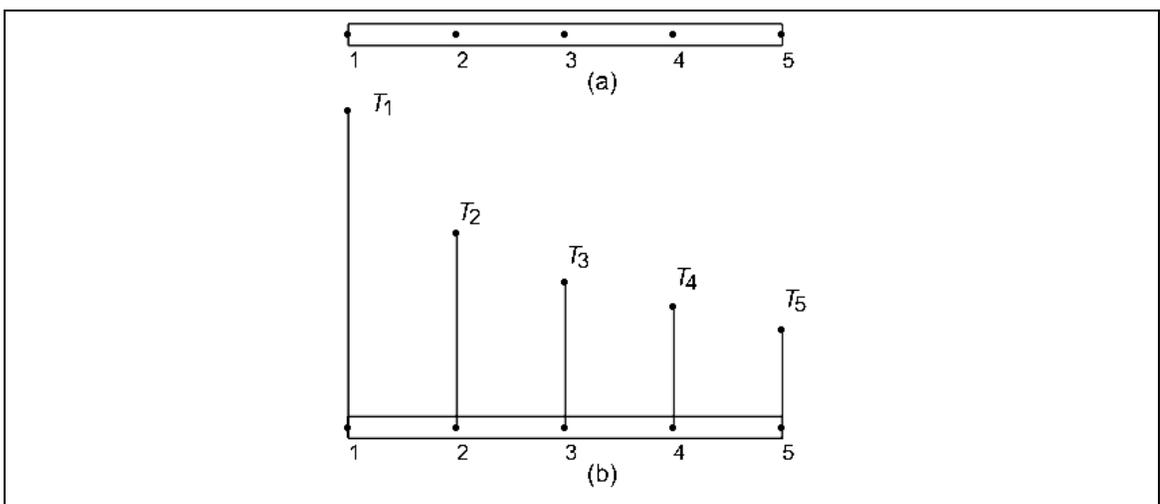
- La aproximación mediante un número de intervalos discretos del campo físico (dominio continuo) en los elementos finitos proporciona una buena precisión aún con funciones de aproximación simples. Simplemente aumentando el número de elementos se puede conseguir aumentar la precisión.
- El lugar de la aproximación lleva a escasos sistemas de ecuaciones para un problema discretizado. Esto ayuda a facilitar la solución de problemas que tienen un número muy grande de incógnitas nodales (BARTON y RAJAN, 2000).

El concepto fundamental del FEM puede ser ilustrado más fácilmente usando un ejemplo unidimensional de la distribución de temperatura en una aleta, como se muestra en la FIGURA 4. La función continua es  $T(x)$  y el dominio es el

intervalo  $0,L$  a lo largo del eje  $x$ . Cinco puntos a lo largo del eje  $x$  son definidos y rotulados (FIGURA 5a). Estos puntos son los nodos; ellos no tienen que estar igualmente espaciados. Podrían haberse definido más de cinco puntos, pero estos cinco son suficientes para ilustrar los conceptos básicos. Los valores de  $T(x)$  son luego especificados en cada nodo. Estos valores se muestran gráficamente en la FIGURA 5b y son rotulados para coincidir los números de los nodos,  $T_1, T_2, \dots, T_5$ .

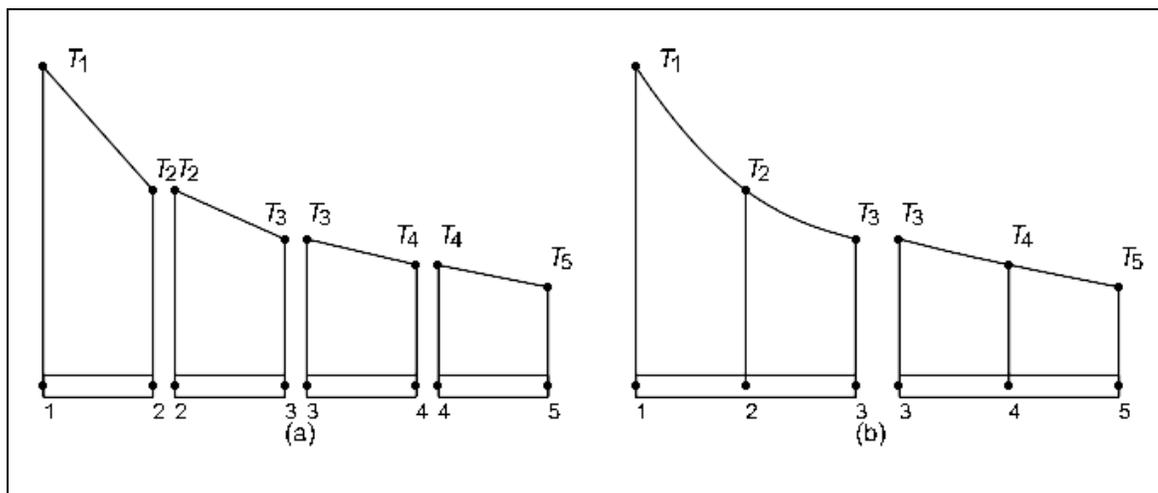


**FIGURA 4.** La distribución de temperatura en una aleta uni-dimensional.



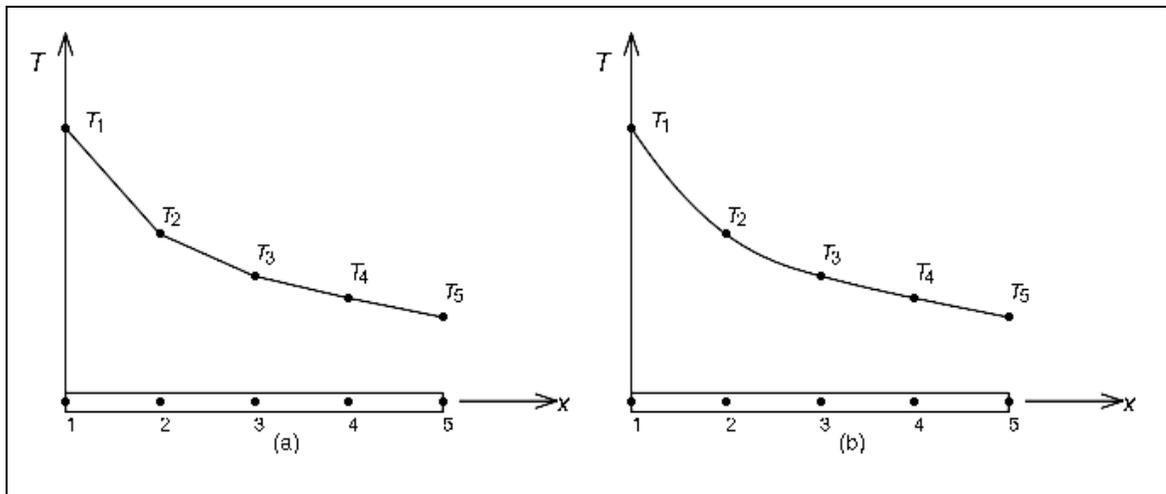
**FIGURA 5.** Los puntos nodales y los valores asumidos de  $T(x)$ .

La división del dominio en elementos puede proceder de dos formas. Podemos limitar cada elemento a dos nodos produciéndose cuatro elementos (FIGURA 6a), o podemos dividir el dominio en 2 elementos cada uno con tres nodos, (FIGURA 6b). El polinomio del elemento es definido usando los valores de  $T(x)$  en los puntos nodales del elemento. Si subdividimos la región en cuatro elementos, habrán dos nodos por elemento, y la función del elemento será lineal en  $x$  (dos puntos producen una línea recta). La aproximación final a  $T(x)$  consistiría en cuatro funciones lineales continuas por trozos, cada una definida sobre un elemento individual (FIGURA 7a).



**FIGURA 6. División del dominio en elementos.**

La división del dominio en dos elementos permite que la función del elemento sea una ecuación cuadrática. La aproximación final a  $T(x)$  en este caso serían dos funciones cuadráticas continuas por trozos (FIGURA 7b). Las funciones del elemento constituyen una aproximación continua por trozos porque las pendientes de estas dos funciones cuadráticas no son necesariamente las mismas en el nodo tres.

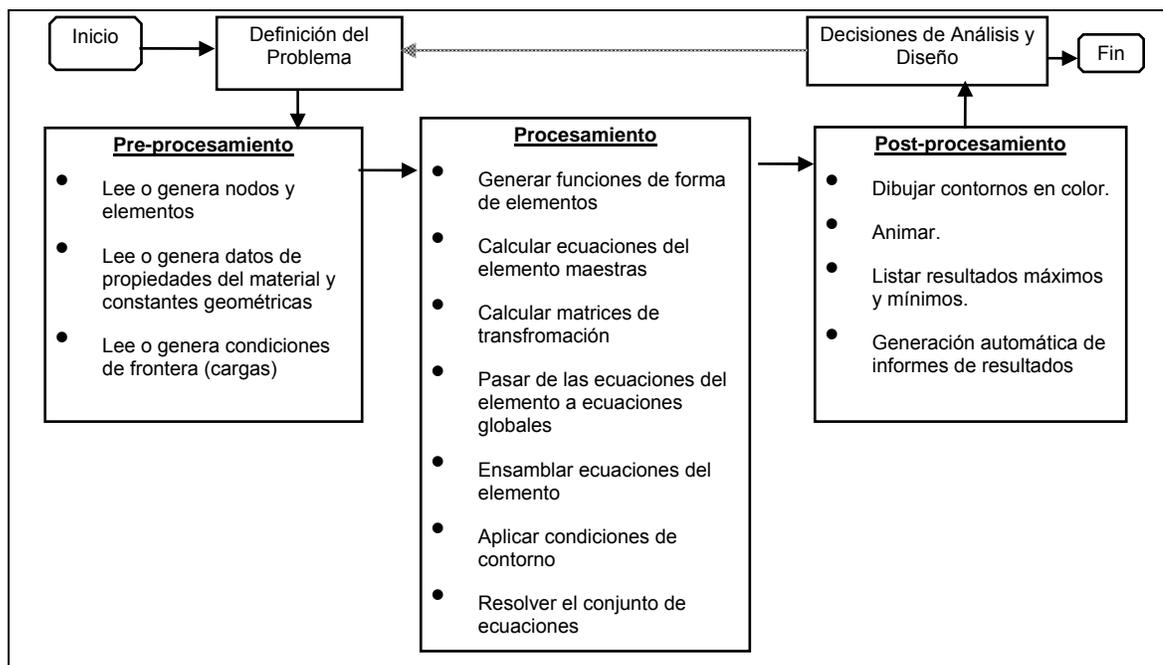


**FIGURA 7. Modelos discretos para la distribución de temperatura unidimensional.**

Generalmente la distribución de temperatura es desconocida, y deseamos determinar los valores de esta cantidad en ciertos puntos. El procedimiento es el mismo descrito antes pero con un paso adicional. Un juego de nodos es definido y los valores de temperatura en estos nodos son  $T_1, T_2, T_3, \dots$ , los cuales son ahora variables ya que no son conocidos. El dominio es dividido en elementos, y se define una ecuación de temperatura para cada uno. Los valores nodales de  $T(x)$  deben ahora ser “ajustados” tal que proporcionen la “mejor” aproximación posible a la verdadera distribución de temperatura. Este ajuste se logra minimizando alguna variable asociada con el problema físico. Una funcional relacionada a la ecuación diferencial de gobierno es minimizada cuando se consideran problemas de transferencia de calor. El proceso de minimización produce un juego de ecuaciones algebraicas lineales que pueden ser resueltas para los valores nodales de  $T(x)$  (SEGERLIND, 1984).

El proceso computacional del FEM típicamente consiste en tres pasos (KARDESTUNCER, 1987; BARTON y RAJAN, 2000; MOLERO, 2001) (FIGURA 8):

- **Pre-procesamiento**, o preparación del modelo, involucra la generación de la geometría, la malla, y los elementos (DATTA, 1998) y se especifican los datos necesarios para el análisis, incluyendo el tipo de análisis, tipo de elementos, definición de los elementos, propiedades del material, cargas y parámetros de análisis (ALGOR, 2003) y se le dicen al computador las ecuaciones de gobierno, condiciones de frontera, propiedades, y métodos de solución a utilizarse;
- **Procesamiento**, en el cual el computador resuelve el problema; y
- **Post-procesamiento**, o revisión de los resultados, que involucra visualizar la solución, usando diagramas de contorno (“*contours*”) en color o sombreados, cortes sobre el modelo, listados de máximos y mínimos, archivos de imágenes (JPEG, GIF, BMP, etc.) y creando películas de los acontecimientos virtuales (DATTA, 1998; ALGOR, 2003; MOLERO, 2001).



**FIGURA 8. Pasos de un análisis típico por elementos finitos.**

FUENTE: KARDESTUNCER (1987), BARTON y RAJAN (2000), MOLERO (2001).

**2.3.1 Generación de la malla (*mesh*).** En este paso de pre-procesamiento, la geometría ya definida necesita ser dividida en piezas más pequeñas, los elementos, para una solución numérica. La colección de elementos es llamada malla (*mesh*). Mientras en más partes es dividida la geometría, más exacta es la solución final, pero el tiempo computacional aumenta (a veces dramáticamente) y puede eventualmente hacerlo irrealista de calcular. Así, este paso es un balance cuidadoso entre proveer suficientes elementos (o nodos) tal que todas las físicas esenciales sean capturadas, pero no demasiadas.

Este proceso de mallado, es la fase más crítica en el análisis por elementos finitos. El tipo y colocación de cada elemento, así como su densidad, tiene profundos efectos en la precisión de resultados (MOLERO, 2001).

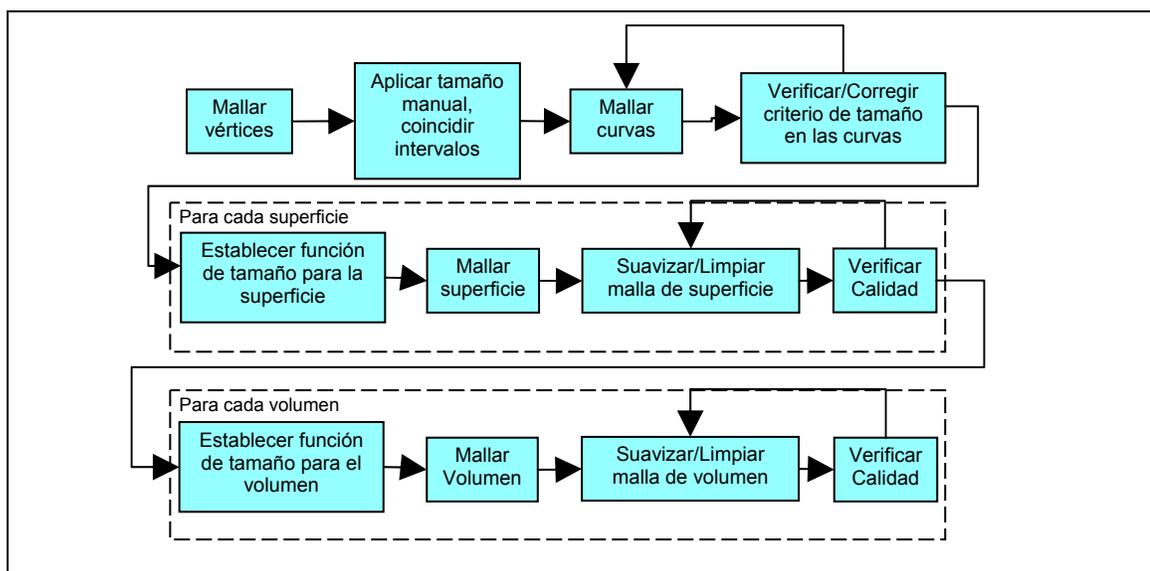
No es posible concretar el número de elementos que se requieren para obtener en cada caso la solución más satisfactoria, ya que va a depender de la estructura del modelo en estudio. La elección de la subdivisión más conveniente ha de realizarse de acuerdo con la experiencia, basándose, si es posible, en resultados obtenidos mediante ensayos. En cualquier caso, se deben poner en práctica soluciones que hagan intervenir mallas de diferentes dimensiones con el fin de asegurar la convergencia de los resultados (LARA, 2003).

Hoy en día, los software CAE pueden ahorrar el trabajo de creación manual de la malla pues incluyen Generadores Automáticos de Malla (*Automatic Mesh Generators*).

El desarrollo de mallas automáticas en geometrías 3D complejas que también se adaptan a la solución es un tema de la investigación importante en sí mismo (CAREY, 1997; OWEN, 2003). La facilidad de la generación de malla se está mejorando constantemente (DATTA, 1998).

La generación automática de mallas se ha convertido en una herramienta común para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales parciales sobre regiones de forma irregular compleja. La generación numérica de mallas puede pensarse como un procedimiento para distribuir ordenadamente a un conjunto de observadores sobre un dominio físico, de tal manera que la comunicación entre ellos sea eficiente y todos los fenómenos físicos sobre el dominio completo puedan ser representados con suficiente exactitud por este número finito de observadores. Una malla es una estructura sobre la cual se construirá una solución numérica. Esta solución aproxima con cierta exactitud el comportamiento del fenómeno bajo estudio (DE LA CRUZ, 2002).

Conseguir una malla de alta calidad puede ser la parte de mayor consumo de tiempo en un análisis de elementos finitos, pero los resultados hacen que bien valga la pena. Una buena malla es el balance de precisión y tiempo computacional; las mallas de calidad convergen rápidamente, producen resultados precisos y no producen errores (ALGOR, 2003).



**FIGURA 9. El proceso de generación de la malla.**

FUENTE: OWEN (2003)

**2.3.1.1 Técnicas de generación de malla.** Existen principalmente dos tipos de mallas que pueden caracterizarse por la forma en que se conectan los nodos. A continuación se discutirán en forma rápida los principales tipos de mallas que se conocen y la forma en que éstas son generadas (DE LA CRUZ, 2002).

**2.3.1.1.1 Mallas estructuradas:** Las mallas estructuradas tienen una conectividad regular, lo cual significa que cada punto tiene el mismo número de vecinos (en algunos casos un número pequeño de puntos puede tener diferente número de vecinos). Los puntos de la malla pueden ser indexados (por 2 índices en 2D, 3 índices en 3D) y los vecinos de cada punto pueden ser calculados fácilmente. En dominios rectangulares es simple construir una malla. El problema aparece cuando se requiere construir mallas estructuradas en dominios irregulares. Generalmente las mallas se construyen de tal manera que las fronteras coincidan con las líneas coordenadas, es decir, se usan coordenadas curvilíneas. Lo anterior produce como resultado soluciones muy precisas cerca de la frontera. Para flujo de fluidos este tipo de mallas permiten una fácil aplicación de modelos de turbulencia, los cuales usualmente necesitan mallas alineadas con las fronteras (DE LA CRUZ, 2002).

**2.3.1.1.2 Mallas no estructuradas:** Las mallas no-estructuradas tienen una conectividad irregular, esto es, cada punto puede tener un número diferente de vecinos. Este tipo de mallas son usadas principalmente en el Método de Elementos Finitos. Existe un amplio rango de formas posibles para los elementos finitos: triángulos, cuadrados, tetraedros, pentaedros, hexaedros, etc. (Ver 2.3.1.2). El método de elementos finitos tiene ciertos requerimientos para una malla (DE LA CRUZ, 2002):

- La malla debe ser válida, es decir, sin agujeros, no se debe intersectar ella misma, etc. Aunque estos requerimientos son obvios, muchos esquemas de generación de mallas requieren una enorme verificación de estas condiciones.
- La malla debe acoplarse con la frontera del dominio, la cual también es una condición obvia pero algunos métodos (por ejemplo triangulación de Delaunay) no satisfacen esto y es necesario verificar y corregir las aristas o caras que crucen la frontera.
- La densidad de la malla debe ser controlable para permitir un equilibrio entre la exactitud de la solución y los cálculos en el tiempo.
- La densidad de la malla debe variar dependiendo de la exactitud deseada en cada lugar del dominio y esta variación deberá ser suave para reducir errores numéricos.
- En general, los ángulos interiores de los elementos de la malla, deben ser aproximadamente iguales (triángulos equiláteros, tetraedros regulares). Elementos altamente distorsionados (triángulos delgados por ejemplo) pueden ocasionar problemas de estabilidad numérica causados por errores de redondeo.

**2.3.1.1.3 Mallas adaptivas:** En los puntos anteriores se mencionaron algunas técnicas para generar mallas estructuradas y no-estructuradas, especificando la densidad de las líneas de la malla. Esta densidad se selecciona para obtener una solución aceptable en exactitud y en tiempo. Es posible especificar ciertos aspectos de la malla al inicio de los cálculos, por ejemplo alta densidad cerca de las fronteras. Pero la solución puede desarrollar fenómenos de interés que no son predecibles con anterioridad. En los lugares donde se dan estos fenómenos es necesario refinar la malla para que la solución sea exacta. En contraste, pueden existir áreas grandes del dominio donde la solución sea muy suave y por lo tanto no es necesario hacer un refinamiento. Entonces, usando una malla que se adapte a la solución conforme ésta se va calculando puede

producir soluciones muy precisas en tiempos óptimos. El esquema de las mallas adaptivas tiene dos partes (DE LA CRUZ, 2002):

- Medición del error local y optimización (refinamiento o engrosamiento) de la malla si es necesario. La medida del error se debe basar en alguna técnica de extrapolación como la de Richardson. La densidad requerida de la malla puede calcularse usando la medida del error local y el orden local del método de discretización. La distribución requerida de la densidad de la malla equilibrará los errores numéricos en todo el dominio.
- Reconstruir la malla usando la distribución especificada de la densidad de la malla. El método utilizado depende de si el problema es estacionario o dependiente del tiempo. Para problemas estacionarios se usa un número pequeño de adaptaciones. En el caso de problemas que dependen del tiempo, un número grande de adaptaciones se requieren conforme la solución cambia. El método de regeneración de la malla debe ser rápido. La interpolación entre malla y malla debe ser muy precisa en casos de dependencia temporal; para problemas estacionarios, esto es menos importante.

Existen tres métodos para refinar una malla: movimiento de los puntos de la malla, refinamiento local y regenerar la malla en su totalidad (DE LA CRUZ, 2002).

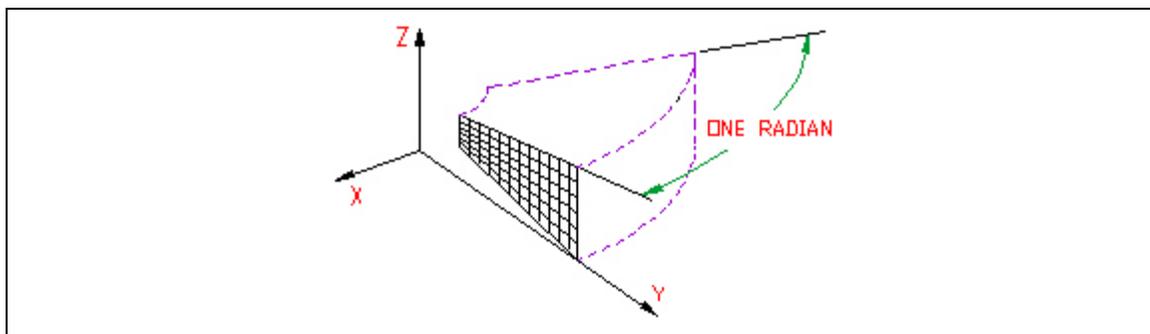
- El movimiento de los puntos de la malla mantiene la conectividad original, pero mueve los nodos. Este método se realiza con ajustes relativamente pequeños sin introducir celdas muy distorsionadas y además es rápido. Es conveniente para mallas estructuradas que requieren una conectividad fija, y también para problemas dependientes del tiempo donde la velocidad de refinamiento es importante.
- En el refinamiento local, las celdas de la malla son subdivididas. Las celdas vecinas deberán tener el mismo grado de subdivisión para mantener la validez de la malla. Este método es rápido y es ideal para problemas con

dependencia temporal. La conectividad de la malla cambia con cada modificación de ésta, por lo que este método es poco conveniente para mallas estructuradas.

- Regeneración de la malla completa usando parámetros nuevos para la densidad de líneas. Es el método más general pero es lento y no existe una forma simple para revertir los refinamientos. Con la triangulación de Delaunay, se adicionan puntos extra a la triangulación original para hacer el refinamiento.

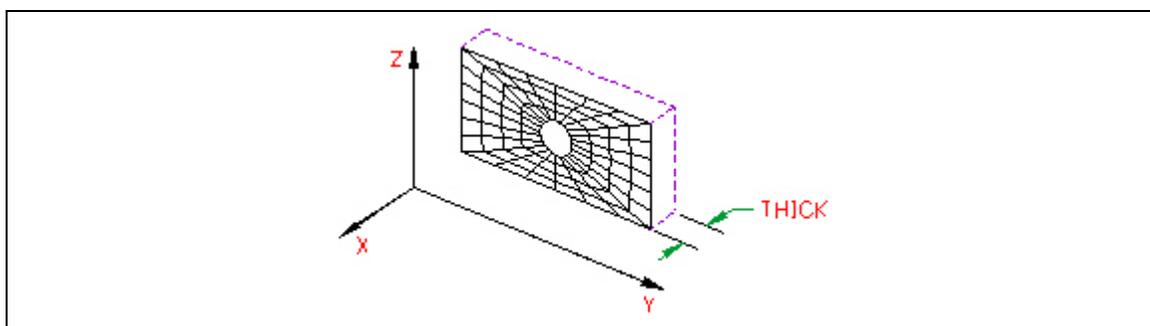
**2.3.1.2 Tipos de elementos en análisis térmico.** Existen diversos tipos de elementos que constituirán la malla, caracterizados por su forma y el número de nodos que lo constituyen, y el tipo a usar dependerá de la geometría del modelo y del tipo de análisis a efectuar. Para el análisis térmico, en particular, se distinguen los siguientes (ALGOR, 2003):

**2.3.1.2.1 Elementos 2D:** (Tipo 40) Son elementos de 3 ó 4 nodos hechos de segmentos de líneas rectas dibujados en el plano Y-Z. No hay flujo de calor (y por lo tanto no hay cambio de temperatura) en el exterior de la dirección del plano. Sólo un grado de libertad está definido para estos elementos, la temperatura. Los elementos 2D pueden ser de 2 tipos: **axisimétricos** (con simetría tanto geométrica como de carga alrededor del eje Z y con coordenadas radiales definidas a lo largo del eje Y, usados en sólidos de revolución), y **planares** (de un grosor específico normal al plano Y-Z y que no exhibe variación normal al plano Y-Z. Aunque el grosor no afecta las temperaturas, afecta el flujo de calor total a través del modelo).



**FIGURA 10. Elementos 2D axisimétricos.**

FUENTE: ALGOR (2003).



**FIGURA 11. Elementos 2D planares.**

FUENTE: ALGOR (2003).

**2.3.1.2.2 Elementos ladrillo (*Brick*):** (Tipo 39) Son elementos 3D de 4, 5, 6 u 8 nodos formulados en el espacio 3D. La determinación de cuántos nodos abarca un elemento dado es hecha automáticamente basada en la conectividad de las líneas. Es decir, el usuario no necesita hacer nada para designar cuántos nodos estarán en el elemento. Así, un modelo hecho de ladrillos 3D puede contener una mezcla de ladrillos de 4, 5, 6 y 8 nodos. El calor fluye en las 3 direcciones, y por lo tanto se calcula una distribución tridimensional de temperaturas. Sólo un grado de libertad está definido para estos elementos, la temperatura.

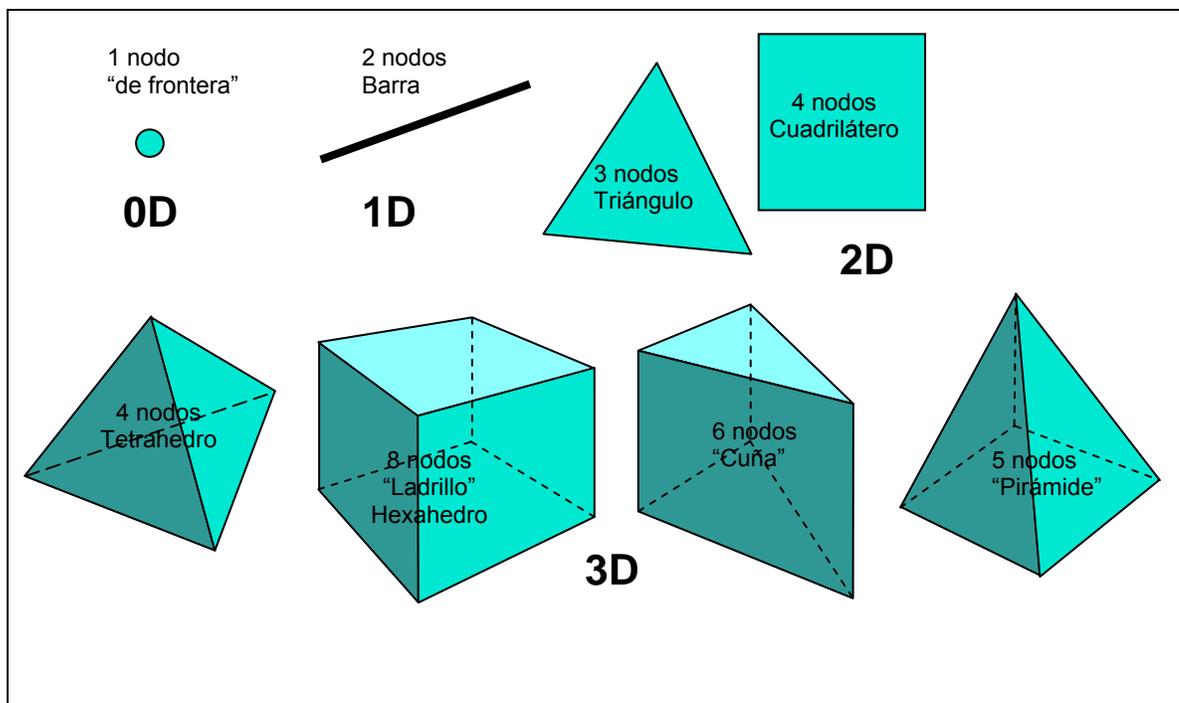
**2.3.1.2.3 Elementos tetraédricos (*Tetrahedra*):** (Tipo 38) Son tetraedros curvilíneos isoparamétricos o sub-paramétricos de 4 ó 10 nodos, formulados en el espacio 3D.

**2.3.1.2.4 Elementos barra (*Rod*):** Son elementos de 2 nodos que presentan una orientación arbitraria en el sistema X, Y, Z. Estos elementos son usados para modelar transferencia de calor en estructuras relativamente largas y delgadas.

**2.3.1.2.5 Elementos placa (*Plate*):** Son elementos de 3 ó 4 nodos formulados en el espacio tridimensional. Estos elementos son usados para modelar transferencia de calor en estructuras tipo placa o cáscara delgadas. Los elementos placa pueden tener cargas convectivas y de radiación en su superficie. Los flujos de calor pueden también ser especificados directamente en sus superficies. Los elementos placa pueden también incurrir generación de calor por unidad de volumen.

**2.3.1.2.6 Elementos de frontera (*Thermal Boundary*):** Son elementos de 1 nodo formulados en el espacio tridimensional. Estos elementos son usados en “temperaturas aplicadas” en un nodo (análisis estacionario y transiente) o una “temperatura dependiente del tiempo” en un nodo (análisis transiente). Son usados en conjunto con los elementos tipo 38, 39 y 40. Una **temperatura aplicada** es usada para fijar un nodo a cierta temperatura a lo largo del análisis. En realidad se agrega un nodo adicional al modelo. Este nodo es mantenido a la temperatura especificada. El calor es transferido desde el nuevo nodo al nodo en el modelo a través de un elemento con una “rigidez” (*stiffness*) térmica especificada. La temperatura del nodo en el modelo dependerá del valor de la rigidez. Un valor alto de rigidez causará que el nodo en el modelo esté muy cerca del nuevo nodo. Una baja rigidez significa que el elemento de frontera absorbe algo del calor y la temperatura del nodo en el modelo podría ser

significativamente más baja que la del nuevo nodo. Una **temperatura dependiente del tiempo** en un nodo es usada en análisis transiente y significa que el nodo al cual es aplicada comenzará el análisis con ese valor de temperatura inicial y podrá cambiar debido a las cargas de calor aplicadas al modelo (ALGOR, 2003).



**FIGURA 12. Tipos de elementos en el análisis térmico.**

FUENTE: OWEN (2003).

**2.3.1.3 Criterios de mallado.** Entre los usuarios de la tecnología de elementos finitos, por mucho tiempo ha existido un debate respecto a cuál forma de elementos produce el resultado más adecuado. A menudo se ha sostenido que los elementos de forma cuadrilátera y hexaédrica tienen un desempeño superior a los elementos triangulares y tetraédricos, al comparar un número equivalente de grados de libertad (OWEN, 2003). Los tetraedros no son muy buenos para el MEF y se necesita de muchos elementos para obtener resultados aceptables. Elementos cuadriláteros y hexaedros son mucho

mejores (DE LA CRUZ, 2002). El uso de hexaedros puede reducir enormemente el número de elementos y, por consiguiente, los tiempos de análisis y post-procesamiento (OWEN, 2003).

El método de mallado que ha llegado a ser el más utilizado para mallas de sólido, y el cual fue elegido para la presente investigación, es aquel que consiste en la combinación del uso de elementos hexaédricos (“ladrillos”) en conjunto con tetraédricos, conocido también como método mixto **“ladrillos/tetraedros”**. Este método genera una malla de la más alta calidad y con el menor número de elementos. Este diseño de malla creará tantos ladrillos de 8 nodos como sea posible con respecto al tamaño de la malla. Cuando tenga que hacerlo creará “cuñas” de 6 nodos, “pirámides” de 5 nodos, o tetraedros de 4 nodos. Estos elementos que no son de 8 nodos serán colocados en su mayor parte hacia el centro del modelo y generalmente no constituirán gran parte del volumen (ALGOR, 2003). El mallado mixto es más rápido y en la gran mayoría de los casos -si no en todos- es más que suficiente (CAESOFIT, 2003).

Otra tecnología más vieja de mallado consiste en hacer que todos los elementos sean tetraedros, pero esta opción requiere significativamente más elementos para conseguir el mismo tipo de exactitud que el método mixto ladrillos/tetraedros. Es típicamente usado en pruebas comparativas. Se debe tener una malla de superficie triangular para usar este diseño de mallado (ALGOR, 2003). El mallado con tetraedros es mucho más rápido, pero mucho más impreciso (los errores habituales van del 20 al 50% o incluso mayores, frente a menos del 5% con mallado hexaédrico) (CAESOFIT, 2003).

Otro diseño de malla es donde todos los elementos son ladrillos, usada sobre todo en procesadores que aceptan sólo ladrillos de 8 nodos. En muchos casos, éstos son procesadores de flujo de fluidos. Esta opción genera 8-10 veces más elementos que el método “ladrillos/tetraedros”.

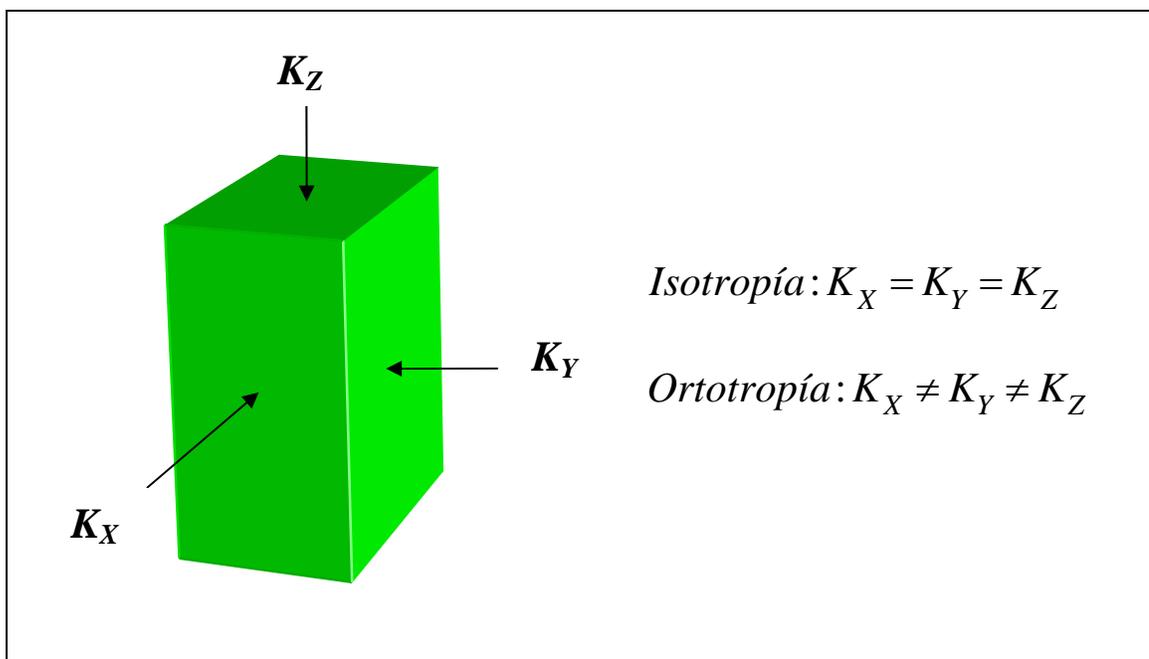
En general se aplica la siguiente máxima: mientras mejor la malla de superficie, mejor es la malla de ladrillos de 8 nodos que el generador de malla de sólido es capaz de crear (ALGOR, 2003)

**2.3.2 Modelo del material.** Según su material los elementos pueden ser de diferentes tipos (ALGOR, 2003):

**2.3.2.1 Material isotrópico:** es aquel donde la conductividad térmica ( $k$ ) es la misma, medida en cualquier punto y cualquier dirección. Además, todas las propiedades del material (conductividad y calor específico) son independientes de la temperatura.

**2.3.2.2 Material anisotrópico:** Son materiales cuyas propiedades varían dependiendo del punto y la dirección de medición.

**2.3.2.3 Material ortotrópico:** No todos los materiales son anisotrópicos; la mayoría tiene uno o más planos de simetría. Aquellos en que sus propiedades varían en tres direcciones ortogonales se denominan ortotrópicos. La FIGURA 13 ilustra la diferencia entre isotropía y ortotropía. En este caso la conductividad térmica puede ser diferente en tres direcciones ortogonales (aunque sólo dos direcciones son usadas para un modelo 2D). Además, todas las propiedades del material (conductividad y calor específico) pueden ser una función de la temperatura (ingresando una tabla de temperatura y propiedades del material).



**FIGURA 13. Concepto de Isotropía y Ortotropía.**

**2.3.3 Propiedades del material.** Un paso muy importante en la ingeniería basada en la simulación es el usar datos de propiedades del material (**densidad, conductividad térmica, calor específico**, etc.) tan exactos como sean posibles. Sin embargo, es aquí donde también los procesos alimenticios están en una leve desventaja comparados con procesos que no usan materiales neutrales. Las propiedades del acero, por ejemplo, son más fácilmente disponibles y quizás tienen mucha menos variabilidad que una sopa de pollo. No es necesario, sin embargo, en la ingeniería basada en simulación tener datos absolutamente exactos (DATTA, 1998).

Algunas formas de obtener datos son las siguientes (DATTA, 1998):

- *Medir datos, si es posible:* Este es el escenario ideal, particularmente considerando cómo variará la formulación del producto alimenticio. A las compañías, por ejemplo, les gustaría medir “en casa” la propiedad específica de su formulación para mantener la confidencialidad y usarla en el diseño de

productos o procesos. A veces esto puede no ser posible debido a la necesidad de técnica detallada, instrumentación cara, o tiempo más largo que el necesario.

- *Usar bases de datos computarizadas*: En otras áreas de manufactura, hay enormes bases de datos de propiedades de materiales, corrientemente disponibles en CD-ROM. Por ejemplo, CenBASE/Materials en Internet es una base de datos de búsqueda de más de 35.000 plásticos, metales, mezclas, y cerámicas de más de 300 catálogos de productos de fabricantes a nivel mundial. En el procesamiento de alimentos, tales bases de datos sólo están comenzando a aparecer (SINGH, 1995; NESVADBA **et al.**, 2004).

- *Usar manuales y libros de datos de propiedades*: Esta es quizás la fuente más popular de datos para investigadores. Aunque no tan exhaustiva como otros manuales de datos de materiales, hay datos considerables en formato impreso (RAO y RIZVI, 1995; OKOS, 1986; PERRY **et al.**, 1984). También hay *papers* resumen que llevan grandes cantidades de datos sobre una propiedad específica, como la propiedad dieléctrica de alimentos (DATTA **et al.**, 1995; TINGA y NELSON, 1973).

- *Usar fórmulas predictivas*: Las correlaciones entre propiedad y composición desarrolladas a partir de datos medidos (CHOI y OKOS, 1986; DATTA **et al.**, 1995) son probablemente más útiles para el propósito de estimar propiedades en CAE, siempre que la correlación disponible sea para un material cercano. Datos exactos de composición se vuelven críticos al usar las correlaciones acertadamente. Por ejemplo, las propiedades dieléctricas pueden cambiar drásticamente con leves cambios en la sal. Libros que tratan de propiedades de alimentos a menudo ofrecen proporcionar fórmulas predictivas o correlaciones (RAHMAN, 1996; RAO y RIZVI, 1995; OKOS, 1986; MOHSENIN, 1980).

- *Análisis de sensibilidad usando estimaciones razonables*: Ya que la idea de la ingeniería basada en la simulación es de cualquier modo probar muchos escenarios “qué pasa si”, una parte natural de este ejercicio es examinar el efecto de variaciones de las propiedades en el proceso. De esta forma, podemos asociar las propiedades y ver el efecto de un rango de propiedades en el proceso. Este proceso se llama *análisis de sensibilidad*. No se limita sólo a variaciones en las propiedades, sino que puede extenderse a variaciones en el mismo proceso. Diferentes condiciones de frontera, diferentes geometrías, etc., pueden ser probadas con relativa facilidad en el computador. Si el resultado del proceso llega a ser bastante sensible a variaciones de los datos de propiedades en un caso particular, señala la necesidad de obtener datos de propiedades muy exactos. El análisis de sensibilidad es uno de los pasos más importantes en CAE (DATTA, 1998).

**2.3.4 Método de solución.** Una vez que las ecuaciones y las propiedades están definidas, el próximo paso es seleccionar un método de solución que proporcione la solución más eficiente. La ventaja de usar el software disponible es que uno puede a menudo elegir un método de solución sin tener que ser muy hábil en los detalles de tales métodos. El software comercial tiende a tener una buena propiedad de convergencia para una amplia variedad de situaciones. El fabricante del software también típicamente tiene recomendaciones de técnicas de solución para diversos tipos de problemas. Un adecuado conocimiento sobre métodos numéricos es de ayuda en esta etapa (DATTA, 1998).

Al igual que la convergencia, la velocidad es muy importante a la hora de obtener resultados. El software de simulación utilizado en la presente investigación ofrece varias posibilidades de “solucionadores” (*solvers*). El método por defecto (y recomendado por el software) es el *Sparse*, el cual puede resolver cientos de miles de ecuaciones en pocos minutos, llegando a ser hasta

430 veces más rápido que otros *solvers* (como *Banded* o el *Skyline*), además de su mejor propiedad de convergencia. El *Sparse* se basa en que las matrices están formadas por muchos elementos iguales a cero, pero se trabaja sólo con los elementos distintos de cero, beneficiándose así tanto en tiempo como en espacio (GUNDERSEN y STEIHAUG, 2002).

**2.3.5 Análisis (procesamiento).** Una vez que se ha especificado el método de solución el computador lleva a cabo el procedimiento de solución. Las ecuaciones son discretizadas y se forman grandes sistemas lineales de ecuaciones algebraicas (matrices). Aunque el usuario puede tener algo de control sobre esta formulación de matrices, en la mayoría de los casos es realizada automáticamente por el software sin mucha intervención del usuario. Típicamente, esta formulación de matrices representa la etapa de mayor consumo de tiempo computacional, y para muchos problemas puede justificar el 80% de los recursos computacionales totales. Las matrices son resueltas usando procedimientos bien conocidos (DATTA, 1998).

La etapa de análisis en el Método de Elementos Finitos puede durar desde un par de minutos a varias horas, incluso días, dependiendo de varios factores como, entre otros: características del computador ocupado (velocidad y tipo de procesador, cantidad de memoria RAM, velocidad del disco duro, etc.), complejidad del modelo, tamaño, tipo y cantidad de los elementos de la malla, la duración elegida para el proceso simulado, y el intervalo de tiempo (“paso de tiempo”) en que se desea que el programa realice los cálculos. (FOODDIGICAEELAB, 2003)

**2.3.6 Revisión de resultados (post-procesamiento).** El post-procesamiento es el importante paso de visualizar los resultados y hacer cálculos posteriores a partir de los datos en bruto generados por la solución. La mayoría de los *software* comerciales pueden mostrar diagramas de contorno, historia, vectores

y otros esquemas. Estos perfiles espaciales o temporales en la completa región 3D pueden proporcionar un discernimiento y entendimiento del proceso que no es posible usando la experimentación. Tal visualización es una de las más grandes ventajas de la Ingeniería Asistida por Computador (DATTA, 1998).

**2.3.7 Confiabilidad de los resultados computacionales.** Nunca se debería confiar ciegamente en los resultados computacionales, y el software nunca debería usarse como una caja negra. Sin embargo, también es importante aceptar que no hay ninguna manera segura de confirmar los resultados computacionales. Hay varias maneras de minimizar las posibilidades de obtener una mala solución (DATTA, 1998):

- **Chequeando la convergencia de la malla.** Sólo se obtienen soluciones numéricas en lugares discretos como un punto de malla (nodo). La solución numérica siempre tiene una cierta cantidad de error asociada con ella. El error total en una solución final está compuesto por el error de discretización más el error de redondeo. El error de discretización es el error de aproximación. Por ejemplo, una solución usando software de elementos finitos típicamente no satisface la ecuación de gobierno original en todas partes. En cambio, satisface la ecuación en el promedio. El error de redondeo es el error de cálculo originado por la “longitud de palabra” finita del computador. Para reducirlo, necesitan ser llevados más lugares decimales. El error entre la solución real y la solución numérica aproximada necesita mantenerse en un mínimo. La manera más significativa de reducir tal error es aumentar el número de puntos de malla o elementos.

No se sabe a priori cuántos elementos o puntos de malla son suficientes para un problema; depende de la física del problema. Así, un paso importante es aumentar el número de elementos o puntos de malla y chequear si la solución cambia apreciablemente. Si la solución cambia significativamente, puede ser un

signo de que el número de elementos usados no fue suficiente, y el cálculo tendría que ser repetido usando un número más grande de elementos. Este proceso se repite hasta que la solución ya no cambie apreciablemente a medida que se agreguen más puntos de malla o elementos. En este punto, se asume que la solución ha convergido.

El proceso de aumentar los puntos de malla y de resolución puede automatizarse completamente en algún software usando una técnica llamada mallado adaptivo, donde el software agrega automáticamente más elementos o puntos de malla dondequiera que se necesite, basado en errores de truncamiento locales estimados. Aunque esta opción está disponible en unos pocos programas como FLUENT, no está típicamente disponible en muchos de los programas de CFD.

- **Revisando el Archivo de Entrada.** El archivo de entrada debe verificarse para confirmar que el computador, de hecho, está usando la misma geometría, ecuación de gobierno, condiciones de frontera y condiciones iniciales, y propiedades, como se pensó. La visualización usando gráficos es una excelente herramienta para este propósito.
- **Usando el sentido común.** El chequeo más obvio e inmediato es visualizar los resultados y ver si ellos tienen sentido. Por ejemplo, en un cálculo calorífico que no involucra una fuente de calor, las temperaturas por todas partes y en todo momento deben estar entre las temperaturas iniciales y de frontera. Cualquier valor de temperatura fuera de este rango señalaría ciertamente un problema con el proceso computacional.
- **Comparando con Datos Experimentales.** Después de las citadas verificaciones numéricas y de sentido común, un paso importante puede ser comparar los resultados con datos experimentales, si es en absoluto posible. La

validación experimental es a menudo un paso crítico, aun cuando tal validación puede hacerse para un problema más simple, o para un número limitado de parámetros. Los esfuerzos adicionales en la comprobación experimental del modelo pueden ser recompensados por un aumento en la confianza del modelo.

- **Empezando con un Problema más Simple.** Es a menudo deseable empezar de un problema más simple para el que las soluciones sean conocidas o sean fácilmente comprobables. Es típicamente más fácil de construir la complejidad sobre el modelo simple.

**2.3.8 Ventajas y desventajas del Método de Elementos Finitos.** El Método de Elementos Finitos ofrece muchas ventajas importantes al ingeniero (BARTON y RAJAN, 2000):

- Es fácilmente aplicable a objetos de formas irregulares complejas, cuerpos no homogéneos (compuestos de varios materiales diferentes y con diferentes propiedades), cuerpos de materiales no isotrópicos (ortotrópicos, anisotrópicos) y con condiciones de frontera complejas.
- Condiciones de frontera tales como cargas superficiales discontinuas, no presentan dificultad para el método. Condiciones de frontera mezcladas pueden ser manejadas fácilmente (SEGERLIND, 1976).
- El tamaño de los elementos se puede variar, permitiendo que la malla se pueda expandir o refinar, según se requiera (SEGERLIND, 1976).
- Aplicable a problemas de estado estacionario y transiente.
- Aplicable a problemas lineales y no lineales.
- Un solo método puede resolver una amplia variedad de problemas además de transferencia de calor, como mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, reacciones químicas, electromagnetismo, biomecánica y acústica, por nombrar sólo algunos.

- Los paquetes de software FEM de propósito general están disponibles a precios razonables, y pueden ser fácilmente ejecutados en un computador personal.
- El FEM puede acoplarse a programas CAD para facilitar el modelado de sólidos y la generación de mallas.
- Muchos paquetes de software incluyen interfaces GUI (*Graphic User Interface*, Interfaz Gráfica de Usuario), generadores automáticos de malla y sofisticados post-procesadores y gráficos para agilizar el análisis y hacer el pre y post-procesamiento más amigable al usuario.

La simulación usando FEM también ofrece ventajas comerciales a las organizaciones:

- Costos reducidos de pruebas y rediseños acortando de esta forma el tiempo de desarrollo del producto, equipo y/o proceso.
- Identifica tópicos en diseños antes de que designen las herramientas.
- Refina componentes antes de que las dependencias a otros componentes no permitan cambios.
- Optimiza el desempeño antes del prototipo.
- Descubre problemas de diseño antes de que se presenten problemas comerciales y/o legales.
- Permite más tiempo a los ingenieros de usar su juicio y experiencia, y reduce el tiempo de implementación.

Entre las desventajas que se podrían mencionar de este método estarían:

- Se obtiene un resultado numérico específico para un problema específico. No se produce una solución general cerrada, la cual permitiría examinar la respuesta del sistema a cambios en diversos parámetros.
- El FEM se aplica a una *aproximación* del modelo matemático de un sistema (fuente de los llamados errores heredados).

- Se necesita experiencia y juicio con el fin de construir un buen modelo de elementos finitos.
- Un computador poderoso y un software FEM confiable son esenciales.
- Los datos de entrada y salida pueden ser muy grandes y tediosos de preparar e interpretar.
- Problemas numéricos: los computadores trabajan con un número finito de dígitos significativos. Hay acumulación de errores de truncamiento numérico y redondeo. Se puede solucionar evitando unir elementos pequeños con grandes.
- Es susceptible a errores de modelado introducidos por el usuario. Pobre elección de tipos de elementos, elementos distorsionados, geometría mal modelada.

## 3 MATERIAL Y MÉTODO

### 3.1 Lugar de ejecución

El presente trabajo de investigación fue llevado a cabo en el Laboratorio de Procesamiento de Alimentos y en el Laboratorio de Digitalización 3D e Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento y Preservación de Alimentos (**FoodDigiCAELab**, página web: <http://www.fooddigicaelab.uach.cl>), ambos pertenecientes al Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL) de la Universidad Austral de Chile (UACH).

### 3.2 Materiales y equipos

**3.2.1 Materias primas.** Se estudiaron 3 tipos de alimentos:

#### 3.2.1.1 Turiones de espárragos verdes

Nombre científico: *Asparagus officinalis* L.

Familia: Liliaceae.

Nombre vulgar en español: espárrago.

Nombres vulgares en otros idiomas: asparagus (inglés), spargel (alemán), asperge (francés), asparago (italiano).



**FIGURA 14.** Espárragos (*Asparagus officinalis* L.)

El espárrago, por tradición, ha sido considerado un producto de lujo y para satisfacer esa exigente demanda, debido a su reducido período de cosecha y a su breve disponibilidad en fresco, es industrializado en muchas formas: esterilizados (en latas y frascos), congelados, deshidratados (sopas), encurtidos (pickles) e, incluso, como jugo. Esta gran variedad de productos se debe al aprecio organoléptico que el público tiene por el espárrago, más que a su valor nutritivo que no tiene características muy especiales o sobresalientes.

En Chile el cultivo de espárrago se realizó, en pequeña escala, por muchos años para la producción de espárrago blanco. Sin embargo, a partir de la década de los ochenta, se iniciaron las exportaciones de producto fresco, principalmente a Estados Unidos, que motivaron un cambio significativo en el sistema productivo y en el área de cultivo que alcanzó un máximo de 6.960 ha en 1988. Después de una disminución a menos de 3900 ha en 1993, se ha notado un renovado interés en la especie, que ha llevado el cultivo a cerca 4500 ha en la actualidad. Esta superficie, concentrada en las regiones VIII, X y RM, más la significación económica de la producción han hecho del espárrago una especie importante en Chile.

Hasta la fecha para los cálculos de ingeniería es común encontrar, en la literatura especializada, una aproximación de la forma real considerándose como un cilindro infinito, y a veces como un semicono (ZÚÑIGA, 2000).

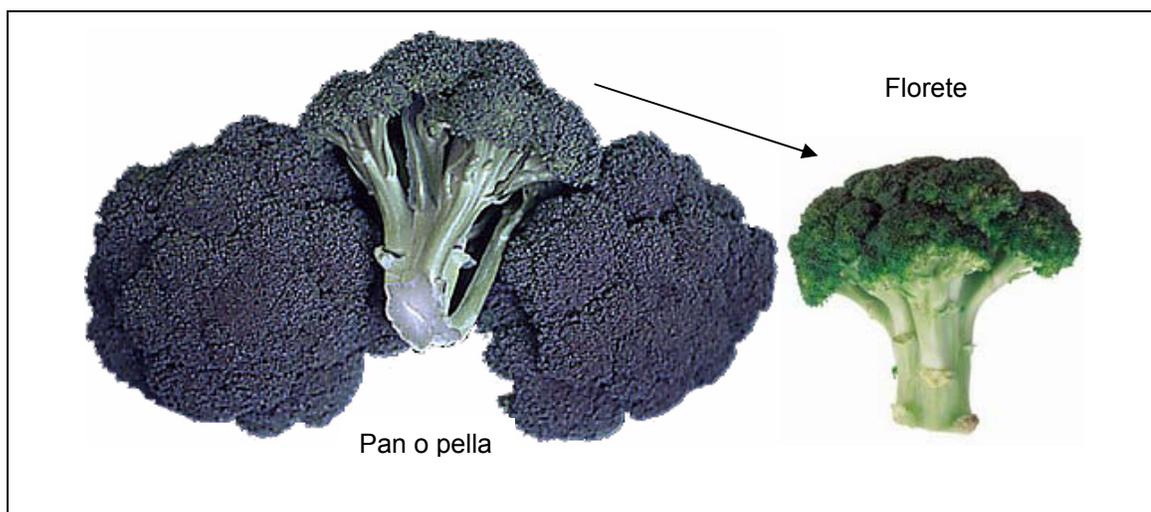
### 3.2.1.2 Floretes de Brócoli

Nombre científico: *Brassica oleracea* L. var *italica*

Familia: Brassicaceae.

Nombres vulgares en español: brócoli, bróculi.

Nombres vulgares en otros idiomas: broccoli, sprouting broccoli (inglés), Brokkoli (alemán), brocoli (francés), cavolo broccolo (italiano).



**FIGURA 15. Brócoli (*Brassica oleracea* L.)**

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. Adicionalmente, en el último tiempo se han determinado una serie de compuestos que tendrían efectos benéficos en la prevención de 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. La cabeza o pella del brócoli se consume cocido en ensalada y diferentes platos.

El cultivo comercial de brócoli en Chile se inició recién a principios de los '80, 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, VI y VII.

Hasta la fecha para los cálculos de ingeniería, referidos a la transferencia de calor, ha sido común considerar básicamente la parte del tallo de los floretes, por representar la parte de mayor espesor, y éste a su vez ha sido considerado como un cilindro infinito (GALLARDO, 2004).

### 3.2.1.3 Camarones (Gambas)

Nombre científico: *Haliporoides diomedeeae*

Familia: Solenoceridae

Nombre local: Gamba

Nombre inglés: Deep water prawn



**FIGURA 16. Camarón o Gamba (*Haliporoides diomedeeae*)**

Las gambas son crustáceos decápodos nadadores que están compuestos del carapacho que cubre el cefalotórax y el abdomen, conocidos respectivamente como cabeza y cola, esta última también cubierta por una concha un poco menos dura y fuerte. Los camarones están acusados de contener mucho colesterol. En realidad 100 gramos contienen alrededor de 100 miligramos de colesterol, la tercera parte que en un huevo y si bien son los que contienen más colesterol de la mayoría de los productos del mar, es menor que en muchos animales ricos en proteínas. Son ricos en proteínas y bajos en grasas y carbohidratos, conteniendo algo del ácido graso omega-3, considerado reductor del colesterol en la sangre. Tienen alto contenido de calcio y de fósforo y algunas vitaminas y minerales. Aportan alrededor de 100 calorías por 100 gramos de parte comestible. Con respecto a las vitaminas, éstas son escasas, sólo cabe citar la vitamina E, de acción antioxidante.

Su comercialización se hace generalmente: a) **vivos** (muy poco, casi exclusivamente en Japón); b) **frescos** (no vivos), enteros o sólo la cola; pelados, pelados y desvenados; pelados, desvenados y abiertos como mariposa, que cuando sólo están abiertos hasta el cuarto segmento, inclusive, se llaman estilo Western; pelados con la cola; y en pedazos; c) **cocidos y congelados**, en este caso: enteros; la cola; pelados, pelados y desvenados; y pelados desvenados y empanizados; por último pueden ser congelados individualmente o en bloques generalmente de 2 kilos; d) camarones **enlatados** y los camarones **secos**.

Hasta la fecha para los cálculos de ingeniería, especialmente para el caso de transferencia de calor, ha sido común encontrar una aproximación de la forma real considerándosele como un semicono o cono truncado.

**3.2.2 Experimentación en laboratorio.** Los alimentos fueron sometidos a un proceso de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento, donde se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- **Equipo de hidrocalentamiento.** Se dispuso de un baño de agua termostático marca GCA/PRECISION SCIENTIFIC (FIGURA 17) cuyas dimensiones interiores son de 31 cm de ancho, 56 cm de largo y 21,5 cm de alto. El diseño del equipo, el cual es un sistema por lotes (“batch”), permitía asegurar una temperatura homogénea del medio de calentamiento antes y durante el tratamiento térmico del alimento. Sus componentes 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 regulador digital marca SONDER, empotrable, modelo EC55, 220 Volts 50/60 Hz., con sonda de temperatura tipo PTC con precisión  $\pm 2\%$  y rango de temperatura de  $-50$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , necesario para mantener la temperatura de trabajo.



**FIGURA 17. Baño de agua termostático marca GCA/PRECISION SCIENTIFIC.**

- **Equipo de hidrogenfriamiento.** Se dispuso de un baño de agua, cuyas dimensiones interiores fueron de 31,5 cm de ancho, 64 cm de largo y 23 cm de alto. El diseño del equipo, el cual es un sistema por lotes (“batch”), permitía asegurar una temperatura homogénea del medio de enfriamiento antes y durante el tratamiento térmico del alimento.
- **Termocuplas.** Para la medición de temperaturas se utilizaron 2 tipos de termocuplas:
  - Termocuplas tipo T (cobre-constantán) flexibles marca Physitemp® con aislamiento KAPTON®, modelo EW-08506-12 (ver FIGURA 18), para medir la temperatura en los alimentos, y cuyas especificaciones se detallan en el CUADRO 2.

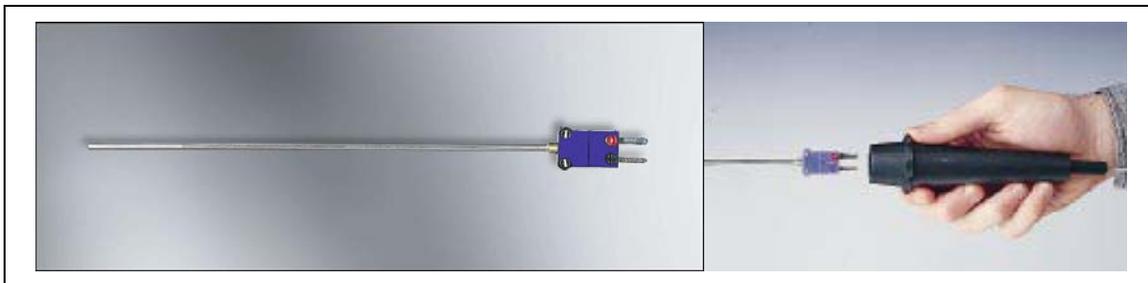


**FIGURA 18. Termocuplas tipo T marca Physitemp® utilizadas.**

**CUADRO 2. Especificaciones de las termocuplas Physitemp® utilizadas.**

<b>Tipo</b>	T
<b>Rango de Temperatura</b>	-418 a 752°F (-250 a 400°C)
<b>Diámetro</b>	0,020" (0,508 mm)
<b>Longitud del cable</b>	5 ft (1,524 m)
<b>Conexiones</b>	miniconector
<b>Empalme</b>	expuesto
<b>Constante de tiempo</b>	0,01 s
<b>Tiempo de respuesta</b>	0,05 s

- Termocuplas tipo T desmontables con mango tipo Master y cable en espiral (FIGURA 19), todos Cole-Parmer, para registrar las temperaturas de los medios tanto de hidrocalentamiento como de hidrogenfriamiento. Las especificaciones para estas termocuplas se detallan en el CUADRO 3.



**FIGURA 19. Termocupla desmontable Cole-Parmer y su mango.**

**CUADRO 3. Especificaciones de las termocuplas desmontables utilizadas.**

<b>Tipo</b>	T
<b>Rango de Temperatura</b>	-418 to 750°F (-250 to 399°C)
<b>Material de la funda</b>	316 SS sheath
<b>Diámetro de la funda</b>	0,125" (3,175 mm)
<b>Empalme</b>	"Grounded"
<b>Constante de tiempo</b>	6 s
<b>Tiempo de respuesta</b>	30 s

- Registrador de temperaturas (*Data Logger*) de 12 canales marca Digi-Sense "12-Channel Scanning Thermocouple Thermometer" (Barnant Co., Barrington, IL 60010) (ver FIGURA 20). Este equipo permite un intervalo mínimo de captura de datos de 4 segundos. A este equipo son conectadas las termocuplas.



**FIGURA 20. Data Logger marca Digi-Sense de 12 canales.**

- Computador personal (PC), con procesador Intel® 80386, 33 MHz, 1792 KB de RAM, con sistema operativo Microsoft® DOS versión 5.0, MS-DOS SHELL (Copyright© Microsoft Corp. 1991), conectado a través del puerto serial al *Data Logger*.
- *Software* de adquisición de datos **PC-DAC** - Data Analysis and Control Software - Versión 1.0 (Copyright© Barnant Company, 1993), que permite al computador recolectar la información del Data Logger (por el puerto serial), haciendo posible la visualización en tiempo real de los datos de temperaturas captados por las termocuplas para luego guardarlos en un archivo para su posterior análisis.

**3.2.3 Sistema de Replicado.** Para obtener la geometría de los alimentos, se obtuvieron réplicas de yeso de ellos mediante técnicas de prótesis dentales. Los materiales utilizados fueron:

- Alginato marca Jeltrate®
- Yeso de color amarillo marca ISODENT®.

**3.2.4 Sistema de Digitalización.** El sistema montado para la digitalización de las réplicas de yeso de los alimentos consistió en:

- Brazo digitalizador 3D de precisión **Microscribe-3DL** (Microscribe-3D™, Immersion Co., San José, CA USA), con exactitud de punta aguja de 0,64 mm (FIGURA 21).
- Computador Personal (PC) Pentium® 4 de 1,8 GHz, 512 MB de RAM y 32 MB de memoria de video, con sistema operativo Microsoft® Windows® XP Professional, con puerto serial al cual era conectado el brazo digitalizador.
- Software modelador 3D de superficies NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) **Rhinoceros 3.0 SR3** (Rhinoceros®, Robert McNeel & Associates, Seattle, WA USA)
- Lápices permanentes finos y grafito N°2
- Pistola sellante de goma (*hot glue gun*) marca PEMCO.
- Plataforma de soporte.



**FIGURA 21. Brazo digitalizador Microscribe-3DL™.**

**3.2.5 Sistema de Simulación.** Para la simulación computacional de los procesos térmicos se requirieron los siguientes materiales:

- Computador Personal (PC) Pentium® 4 de 2,26 GHz, 1 GB de RAM y 128 MB de memoria de video, con sistema operativo Microsoft® Windows® XP Professional.
- Software de obtención de propiedades térmicas de alimentos **FoodProperty v1.0**, disponible *on-line* en la URL <http://www.wamfoodlab.uach.cl/>, el cual permite calcular las propiedades térmicas Conductividad Térmica y Calor Específico, además de las propiedades físicas Densidad y Entalpía de alimentos, para cualquier rango de temperaturas entre -40 y 150°C, utilizando los modelos de **Composición Fraccional** (basado en la composición química y las correlaciones de CHOI y OKOS (1986)) y de **Solución Binaria** (basado en el contenido de agua inicial).
- Software de simulación por Método de Elementos Finitos **ALGOR 16.00** (ALGOR®, ALGOR Inc., Pittsburgh, PA) con módulo “Professional Heat Transfer Core Package” que permite realizar análisis de transferencia de calor en estado estacionario y transiente, y con la capacidad de importar directamente modelos de Rhinoceros® gracias a la función RHINOCEROS® IMPORT EXTENDER.
- Planilla de Cálculo Microsoft® Excel 2002, perteneciente a Microsoft® Office XP (Copyright© Microsoft Corporation 1985-2001).

**3.2.6 Otros.** Se necesitaron, además, accesorios como:

- Pie de metro digital marca Fowler & NSK.
- Cuchilla.
- Rejilla de metal.
- Termómetros de precisión marca ASTNA.
- Cinta adhesiva de teflón.
- Alargadores (cables compensados) para termocuplas tipo T (cobre-constantan), calibre 20.
- Cronómetro digital marca CASIO.
- Bureta graduada de 250 mL.

- Cápsulas de aluminio.
- Desecador con sílica.
- Pinza metálica.
- Balanza electrónica BEL ENGINEERING modelo MARK 205A, con precisión 4 decimales.
- Estufa Gallenkamp, Hotbox Oven, Size Two, H-150, a  $100 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ , Inglaterra.
- Estufa MEMMERT a  $100 (\pm 2) ^\circ\text{C}$
- Vaselina líquida medicinal.
- Agua destilada.

### 3.3 Metodología

El desarrollo de la presente investigación se puede dividir en las siguientes etapas:

- Modelación matemática del fenómeno físico.
- Adiestramiento en el uso de los software.
- Experimentación en laboratorio.
- Obtención del modelo digital de los alimentos utilizados.
- Simulación computacional del tratamiento térmico.

**3.3.1 Modelación matemática del fenómeno físico.** La selección y subsiguiente solución numérica en elementos finitos del modelo matemático a formular requiere de las siguientes suposiciones:

- (1) La transferencia de calor ocurre sólo por conducción en el interior del producto.
- (2) Las condiciones del medio (temperatura y coeficiente convectivo) permanecen constantes sobre la superficie irregular del producto.
- (3) El alimento es considerado isotrópico y de composición uniforme. La composición del producto no varía durante las etapas de calentamiento y enfriamiento.
- (4) Las propiedades termofísicas ( $k$ ,  $C_p$  y  $\rho$ ) del producto son constantes con respecto a la temperatura.
- (5) No hay contradifusión del agua y la pérdida de sólidos solubles se considera despreciable.

De acuerdo a las consideraciones teóricas, el modelo apropiado para representar el proceso combinado de hidrocalentamiento e hidrogenfriamiento de alimentos de formas irregulares complejas es aquella que considera un proceso de conducción de calor transiente con propiedades térmicas constantes con la

temperatura. El modelo completo se sustenta en la siguiente Ecuación de Gobierno, Condiciones Iniciales y Condiciones de Borde:

**3.3.1.1 Ecuación de gobierno.** La ecuación tridimensional para la conducción de calor transiente en un material isotrópico y homogéneo, con propiedades termofísicas constantes con la temperatura y orientación, puede ser descrita por la siguiente ecuación diferencial, que en este caso está expresada en coordenadas rectangulares:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Siendo  $\alpha = k/\rho C_p$  la difusividad térmica del producto;  $\rho$  = densidad;  $C_p$  = calor específico;  $k$  = conductividad térmica.

El dominio irregular complejo de superficie **S**, correspondiente al modelo digital, representaría las condiciones de asimetría geométrica.

Para completar el modelo matemático, la condición inicial y condiciones de borde para el dominio irregular complejo de superficie **S** son como sigue:

### 3.3.1.2 Condiciones iniciales

Etapa Calentamiento:  $T(x, y, z, 0) = T_{in} \quad ; \text{ para todo } x, y, z, \quad t = 0 \quad (3.2)$

Etapa Enfriamiento:  $T_{in}(x, y, z, t_g) = f(x, y, z) \quad ; \text{ para todo } x, y, z, \quad t = t_g \quad (3.3)$

La ecuación (3.2) indica que la temperatura inicial es uniforme en todos los puntos del dominio, mientras que la ecuación (3.3) indica que la temperatura

inicial de cada punto (nodo) del dominio para la etapa de enfriamiento es la condición final alcanzada al finalizar la etapa de calentamiento (tiempo  $t_g$ ).

### 3.3.1.3 Condiciones de borde considerando un dominio irregular 3D

Etapa Calentamiento:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x,y,z,t) = h_1 [T_{a1} - T_S]_{x,y,z \text{ sobre la superficie límite } S} ; t > 0 \quad (3.4)$$

Etapa Enfriamiento:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x,y,z,t) = h_2 [T_{a2} - T_S]_{x,y,z \text{ sobre la superficie límite } S} ; t > 0 \quad (3.5)$$

Donde  $h$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor;  $T_a$  es la temperatura del medio;  $T_S$  es la temperatura de la superficie del material;  $S$  es la porción de la superficie límite del dominio irregular complejo expuesto a las condiciones convectivas, la cual puede ser más de una porción superficial en el problema a resolver ( $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ ) si así lo amerita;  $\frac{\partial T}{\partial n}$  es la gradiente de temperatura normal a la superficie.

El conjunto de ecuaciones de gobierno, inicial y de borde, fueron solucionadas mediante el Método de elementos finitos. Para este efecto se utilizó el software ALGOR© por su versatilidad, bajo costo y soporte técnico.

**3.3.2 Adiestramiento en el uso de los software.** Primero que todo se destinó un periodo importante de tiempo (aproximadamente seis meses) para el aprendizaje y adquisición de destreza en el uso de los software, tanto del de diseño 3D (Rhinceros®) como el de simulación (ALGOR®). En este periodo se procedió a la lectura de manuales, guías de usuario y cursos Web que acompañan a ambos paquetes de software, y luego a la puesta en práctica de

técnicas de diseño y edición de modelos 3D y la ejecución de diversos análisis de prueba en geometrías regulares, aumentando progresivamente su complejidad hasta trabajar con modelos digitalizados existentes. Se mantuvo a lo largo de esta etapa (y no sólo en ella sino en toda la investigación) una constante comunicación vía Internet con los centros de soporte en línea de ambos software, resolviendo así dudas y actualizando los software cuando fuese necesario para tener las versiones al día.

**3.3.3 Experimentación en laboratorio.** Los alimentos seleccionados (espárragos, brócolis y camarones) fueron sometidos a pruebas experimentales a nivel de laboratorio, en las cuales se realizó un tratamiento térmico combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento, con el fin de obtener curvas de su historial de temperaturas. Las condiciones experimentales se detallan a continuación.

**3.3.3.1 Calibración de las termocuplas.** Las ocho termocuplas fueron conectadas al Data-Logger y fueron calibradas mediante termómetro patrón a la temperatura ambiente del laboratorio. En el momento que el termómetro marcaba la temperatura respectiva del medio (alrededor de 20 °C) se procedió a observar la lectura de las termocuplas, calibrando luego el Data-Logger si fuese necesario. NICHOLAS y WHITE (1994) recomiendan este método para verificar la calibración de todo tipo de termocuplas. El procedimiento de calibración se realizó previo a cada ensayo experimental.

**3.3.3.2 Implementación del sistema de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento.** Para los tratamientos térmicos se montó el siguiente sistema:

- El equipo de hidrocalentamiento fue llenado con agua destilada hasta aproximadamente 3/4 partes de su volumen y por medio del termostato

regulador se configuró una temperatura constante de proceso de aproximadamente **95 °C**. Una de las dos termocupas desmontables fue insertada en este baño para el registro de temperatura del medio.

- El equipo de hidrogenfriamiento igualmente fue llenado con agua destilada hasta aproximadamente 3/4 partes de su volumen y ésta fue mantenida aproximadamente a una temperatura de **3 °C** por medio de los geles refrigerantes. Esta temperatura fue verificada en cada momento por la segunda termocupa desmontable, y agregando geles refrigerantes al agua según fuese necesario para alcanzar y mantener la temperatura deseada.

**3.3.3.3 Selección y preparación de las muestras.** Los alimentos adquiridos fueron seleccionados y almacenados, cuidando de proporcionar las condiciones adecuadas de preservación, siendo, cuando fuese necesario, refrigerados a una temperatura entre 5 y 10 °C y un 95% de humedad relativa.

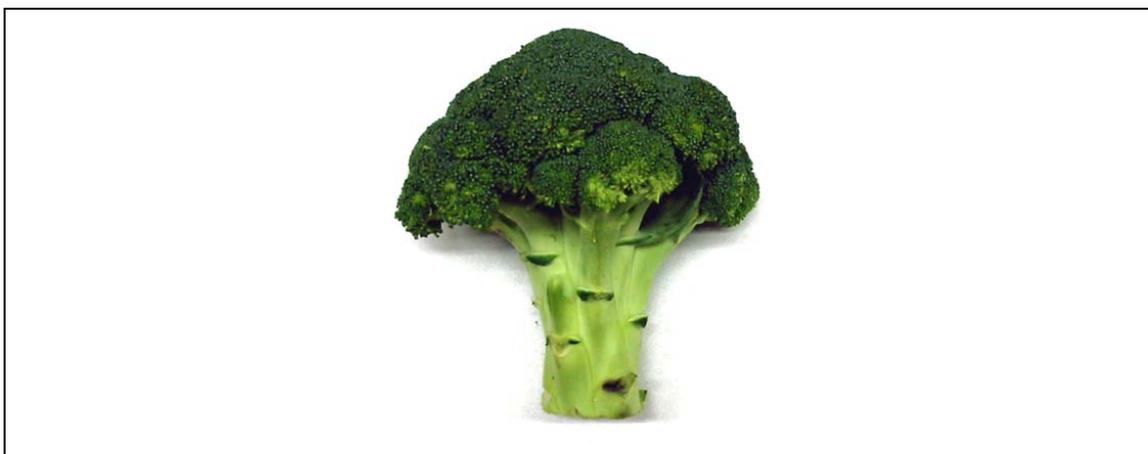
Además de un adecuado estado de conservación y frescura, para cada alimento se utilizaron diferentes criterios de selección:

- **Espárragos:** se adquirieron turiones de espárragos verdes en un supermercado local. Se seleccionaron los que presentaban una longitud mayor a 17 cm. Estos fueron cortados transversalmente con cuchilla a 17 cm medidos desde el extremo superior, y se seleccionaron luego seis turiones cuyo calibre térmico (diámetro menor medido a 2,5 cm del extremo inferior) fuera de aproximadamente 13 mm (FIGURA 22), encontrándose de esta forma dentro de los estándares de las normas para espárragos de exportación (CODEX STAN, 2001). A los seleccionados se les determinó luego su volumen (mediante método de Arquímedes por desplazamiento de agua en bureta graduada), su peso (en balanza analítica) y su humedad (por gravimetría y secado en horno a 100 °C por 48 h).



**FIGURA 22. Turiones de espárragos cortados.**

- **Brócolis:** se adquirieron pellas o “cabezas” de brócoli (FIGURA 23) en un supermercado local. Se procedió a extraer luego los floretes ajustándose a las especificaciones del UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USDA (1980) – y se seleccionaron seis de ellos cuya longitud alcanzara los 5 cm y su calibre (diámetro menor medido a 0,8 cm del extremo inferior del tallo, según GALLARDO (2004)) no superara los 13 mm, siendo luego cada uno numerado del 1 al 6 (FIGURA 24). A los seleccionados se les midió volumen, peso y humedad por métodos similares a los descritos para el espárrago.



**FIGURA 23.** Pella o “cabeza” de brócoli.



**FIGURA 24.** Floretes extraídos de una cabeza de brócoli.

- **Camarones:** se adquirieron gambas en el mercado central de Santiago. Se seleccionaron las que tuvieron una longitud mínima de cola (abdomen) de 7 cm (FIGURA 25).



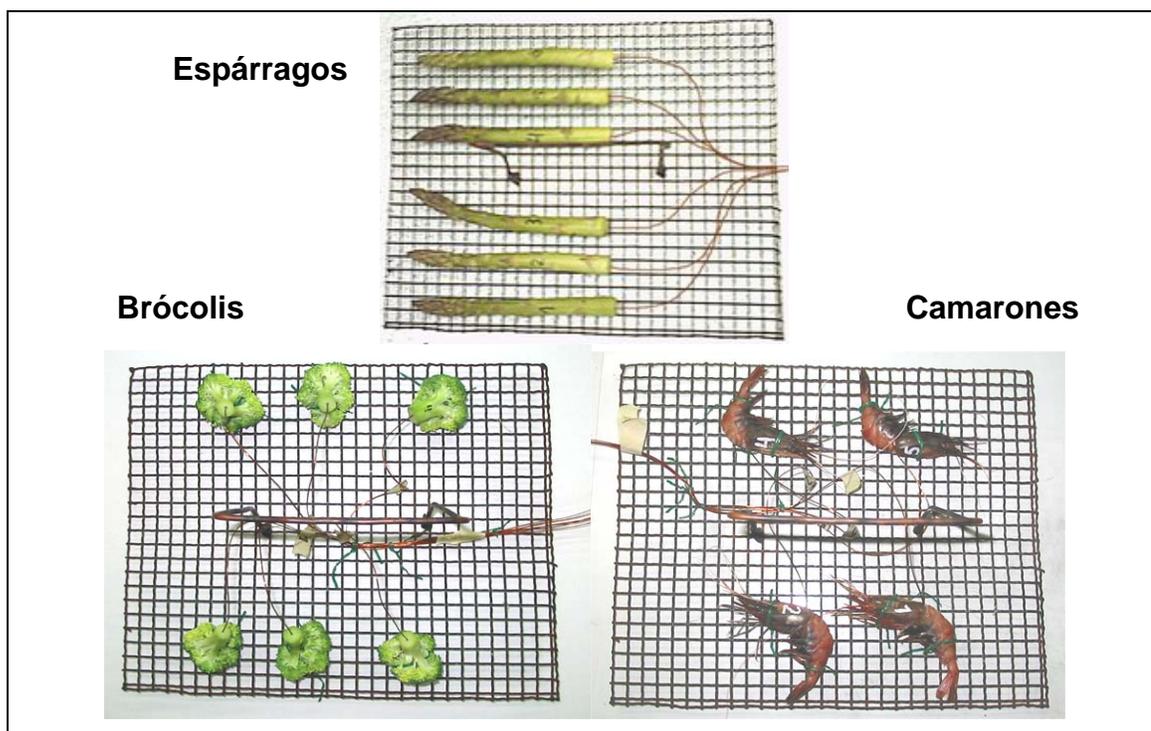
**FIGURA 25. Camarones (gambas) frescos.**

Antes de la experimentación, se esperó que las muestras seleccionadas alcanzaran la temperatura ambiente, alrededor de 20 °C, según termómetro patrón.

**3.3.3.4 Fijación de los alimentos en la rejilla.** Una vez seleccionados y preparados, los alimentos fueron codificados (numerados) con plumón y luego fijados a una rejilla de metal para poder manipularlos en conjunto y asegurar una distancia adecuada entre ellos para lograr una penetración uniforme del calor en toda su superficie. En la FIGURA 26 se puede apreciar la disposición para cada caso.

**3.3.3.5 Inserción de las termocuplas.** Una vez fijados los alimentos en la rejilla, se procedió a la inserción de las termocuplas Physitemp® de la siguiente forma para cada alimento:

- **Espárragos:** las termocuplas se introdujeron de forma axial desde su base por el centro hasta 2,5 cm de profundidad.
  - **Brócolis:** se introdujeron en el tallo de forma axial hasta una profundidad de 0,8 cm.
  - **Camarones:** se insertaron en la unión entre la cabeza (cefalotórax) y el primer segmento abdominal y de forma axial en dirección hacia el telson (extremo de la cola), hasta una profundidad de 3 cm y un caso a 1,5 cm.
- Las termocuplas también fueron fijadas a la rejilla para evitar que movimientos bruscos, debidos a la manipulación, pudieran provocar el desprendimiento de las termocuplas del interior de los alimentos.



**FIGURA 26. Alimentos codificados y fijados en la rejilla con las termocuplas insertadas.**

**3.3.3.6 Configuración del Data-logger.** El data-logger, al cual fueron conectadas las termocuplas, fue configurado para registrar datos de temperatura de todas las termocuplas a un intervalo de **4 segundos** (tiempo

mínimo permitido por este aparato). En el PC al cual estaba conectado el Data-logger se ejecutó el programa **PC-DAC** el cual sería el encargado de recolectar todos los datos registrados en un archivo para su posterior análisis.

**3.3.3.7 Tratamiento térmico.** Insertadas las termocuplas en el alimento se procedió con el tratamiento combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento. El método se efectuó de la siguiente manera:

- **Hidrocalentamiento:** La rejilla con las muestras de alimentos fue sumergida completamente en el agua caliente al mismo tiempo que se activaba la captura de datos en el PC. Se cronometró un tiempo de tratamiento de 5 minutos.
- **Hidrogenfriamiento:** Transcurrido el tiempo de hidrocalentamiento, inmediatamente la rejilla fue transferida y sumergida en el medio de enfriamiento, dejándose allí por un período de 5 minutos.

Las temperaturas y tiempos de proceso para todos los alimentos se detallan en el CUADRO 4.

**CUADRO 4. Parámetros experimentales para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en los alimentos utilizados.**

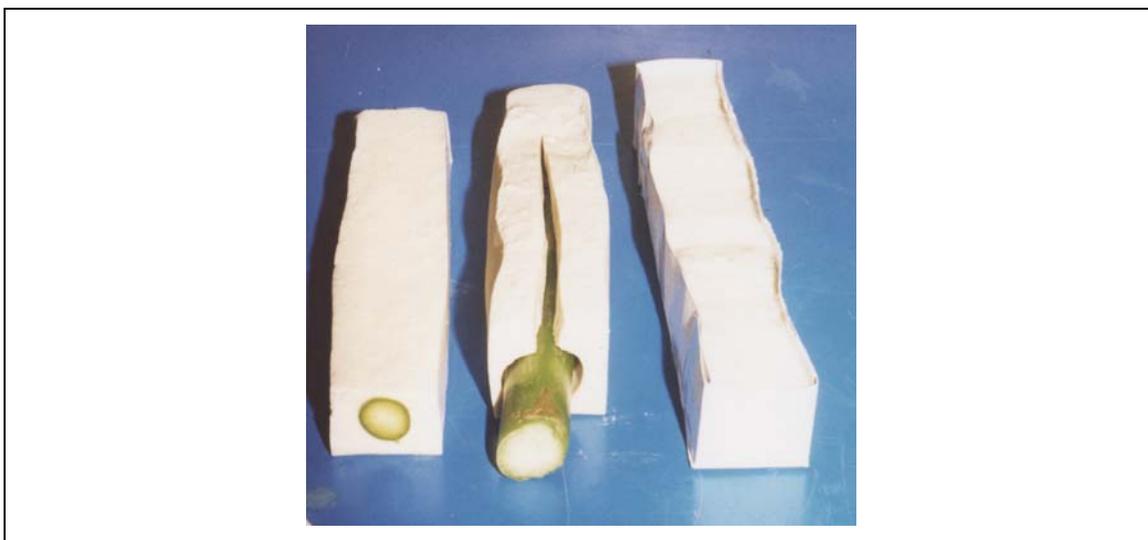
<i>Alimento</i>	<i>Hidrocalentamiento</i>		<i>Hidrogenfriamiento</i>	
	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tiempo (min)</i>
Espárragos	95 ± 1	5	3 ± 1	5
Brócolis	95 ± 1	5	3 ± 1	5
Camarones	95 ± 1	5	3 ± 1	5

Transcurrido el tiempo de tratamiento térmico, se detuvo la captura de datos en el PC, guardándose el archivo con todos los datos de tiempos/temperaturas

registrados. Los alimentos fueron extraídos del baño y de la rejilla, teniendo cuidado de no dañarlos, secándolos luego con papel absorbente para dejarlos preparados para la siguiente etapa de la investigación.

**3.3.4 Obtención del modelo digital de los alimentos.** Luego de aplicado el tratamiento térmico a los alimentos, y debido a la perecibilidad y dificultades de manipulación, se procedió a la obtención de réplicas de yeso de ellos y a su posterior digitalización. Mayores detalles acerca de todo el proceso de obtención de modelos digitales de los alimentos pueden encontrarse en PINO (2004). A grandes rasgos el método involucra las siguiente etapas:

**3.3.4.1 Obtención de réplicas de los alimentos.** A los mismos alimentos tratados térmicamente les fueron obtenidas réplicas en yeso de su forma irregular compleja siguiendo técnicas similares a las de elaboración de prótesis dentales (Ver FIGURA 27) en donde se hace un molde con el material de impresión (alginato), el cual luego es llenado con yeso. De esta forma se obtuvieron réplicas rígidas de yeso que reproducían detalladamente la forma compleja de los alimentos seleccionados con el propósito de obtener modelos 3D digitales por medio de la tecnología de digitalización 3D.



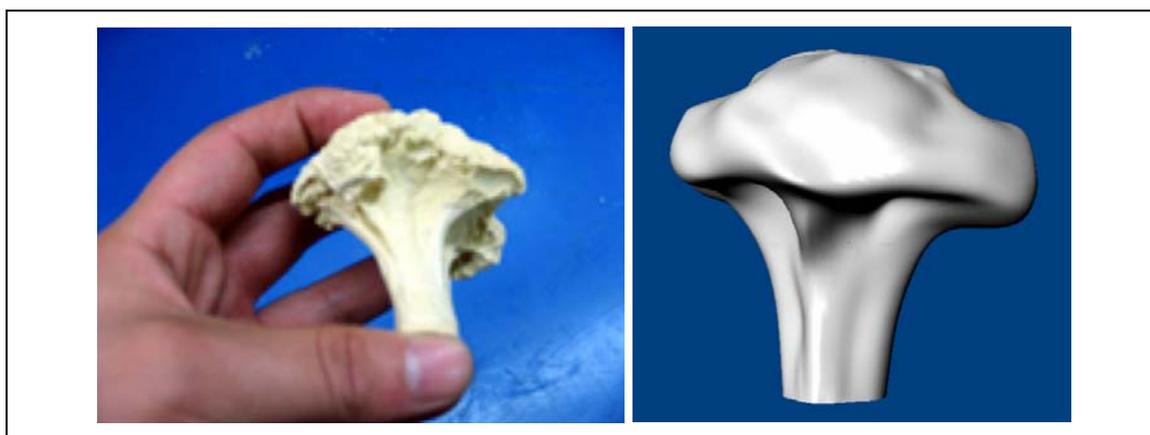
**FIGURA 27. Obtención de réplica de yeso de un espárrago con alginato.**



**FIGURA 28. Réplicas finales en yeso de turiones de espárrago.**

Como se aprecia en la FIGURA 27 y FIGURA 28, en el caso de los espárragos se pudo obtener fácilmente réplicas de la forma de los turiones.

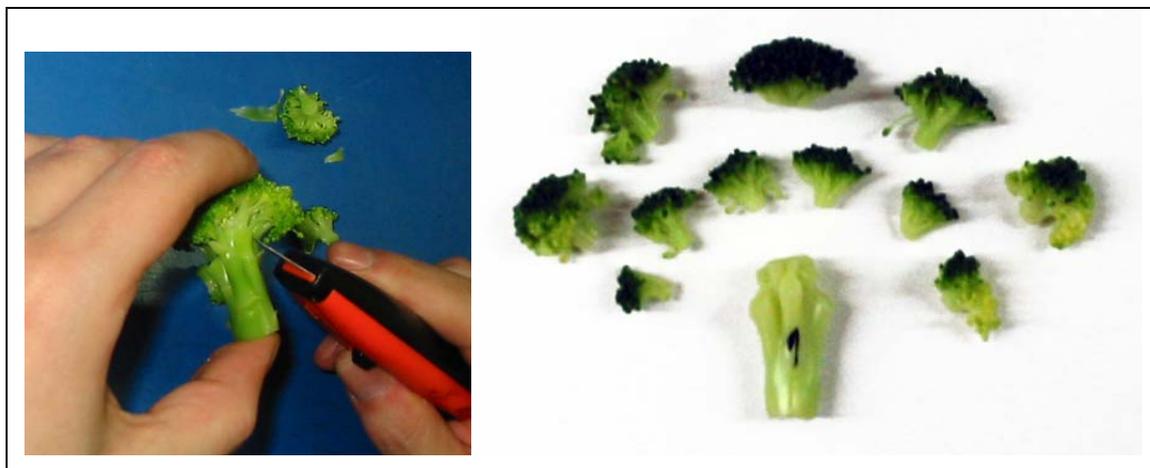
Para el caso de los floretes de brócoli, en ensayos iniciales se presentaron dificultades en la obtención de réplicas fieles de su forma irregular compleja, puesto que, como se ve en la FIGURA 29, no se lograron reproducir las concavidades y espacios interiores presentes entre los pedúnculos y yemas florales de los floretes. En la réplica sólo se consiguieron reproducir las concavidades superficiales, y si éstas eran algo más profundas, eran de difícil acceso por las dimensiones de la punta del brazo digitalizador (ver 3.3.4.3), haciendo posible sólo obtener modelos 3D macizos de bajo detalle, poco útiles para una apropiada simulación del proceso de conducción de calor.



**FIGURA 29. Florete de brócoli en yeso y en 3D resultados de ensayos iniciales.**

Por todos estos motivos fue que se llegó a la determinación de obtener réplicas de sólo los tallos del florete. Luego ellos se digitalizarían y a estos modelos digitales se le agregarían yemas florales mediante modelado computacional 3D en el software Rhinoceros®. Todo este proceso de diseño geométrico se detalla más adelante. Cabe mencionar que la finalidad de esta modelación geométrica es la de realizar la simulación computacional a un florete “completo” de brócoli y reflejar su forma lo más cercana a la realidad considerando así la conducción de calor desde y entre las yemas florales hacia el tallo. En la FIGURA 30 se

muestra un florete de brócoli al cual se le han extraído las yemas florales para obtener una réplica de su tallo, como las que se muestran en la FIGURA 31.



**FIGURA 30. Extracción de los pedúnculos y yemas florales de un florete de brócoli.**



**FIGURA 31. Réplicas finales en yeso de tallos de floretes de brócoli.**

Para el caso de la obtención de réplicas en yeso de los camarones, fue necesario remover partes de su estructura, como las patas y antenas (FIGURA 32), puesto que éstas eran muy finas, no siendo posible obtener de ellos una réplica adecuada. Así como en el brócoli, las patas y antenas del camarón serían más tarde modeladas en 3D en el software Rhinoceros®.

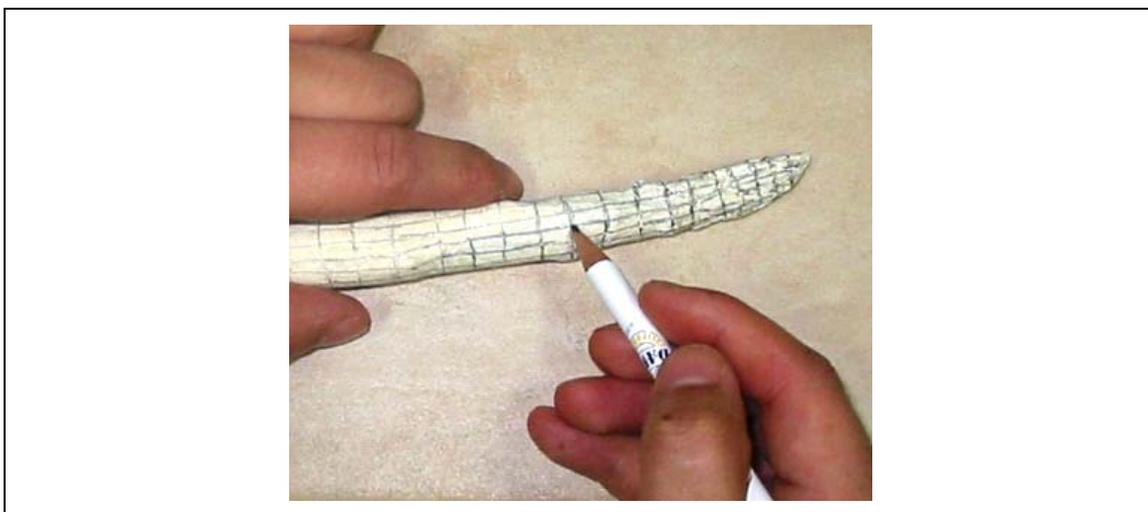


**FIGURA 32. Camarón al cual se le han extraído las patas y antenas.**



**FIGURA 33. Réplica final en yeso de un camarón.**

**3.3.4.2 Trazado de una malla:** Sobre la superficie de cada réplica de yeso se trazó con lápiz grafito una malla o matriz que cubría completamente el área superficial y que representaba sus irregularidades. En la FIGURA 34 puede observarse una réplica de yeso terminada de un espárrago a la cual se le ha trazado la malla.

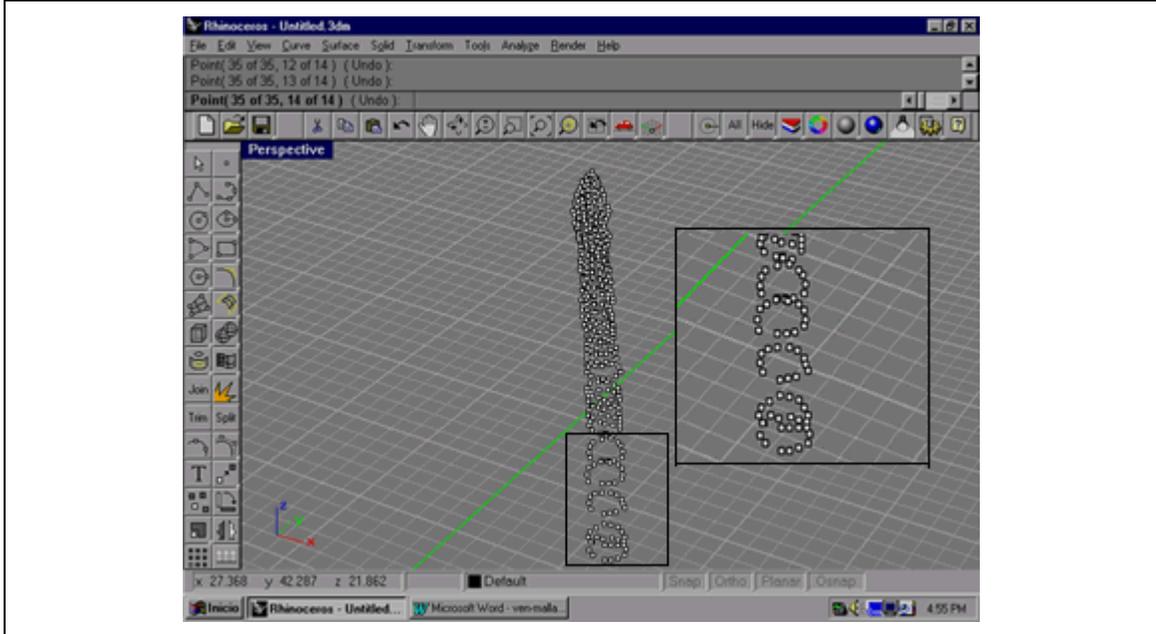


**FIGURA 34.** Trazado de la malla en la réplica de yeso de un espárrago.

**3.3.4.3 Digitalización 3D:** Se procedió a captar las intersecciones de la malla trazada en la réplica de yeso, montada en la plataforma de soporte, utilizando la punta de precisión del brazo digitalizador 3D **Microscribe-3DL™** (FIGURA 35), generándose al mismo tiempo una *matriz de puntos* representada en el software modelador 3D **Rhinoceros 3.0 SR3** (FIGURA 36).

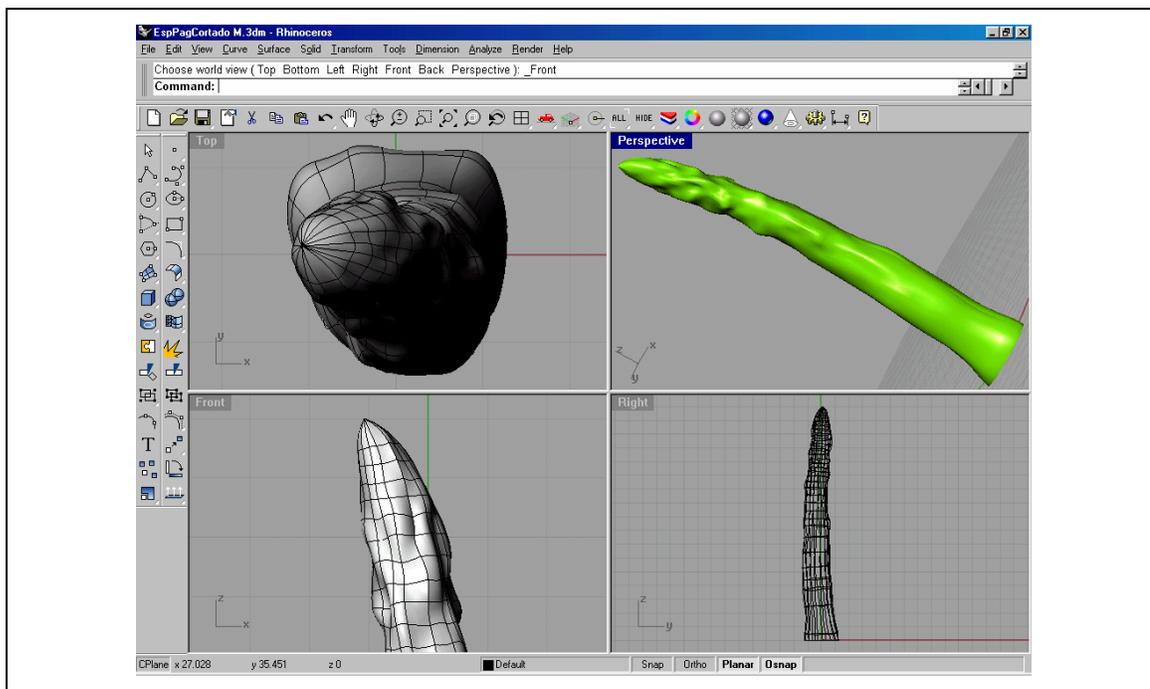


**FIGURA 35.** Captura de puntos de la malla de la réplica de yeso de un espárrago con el brazo digitalizador **Microscribe-3DL™**.

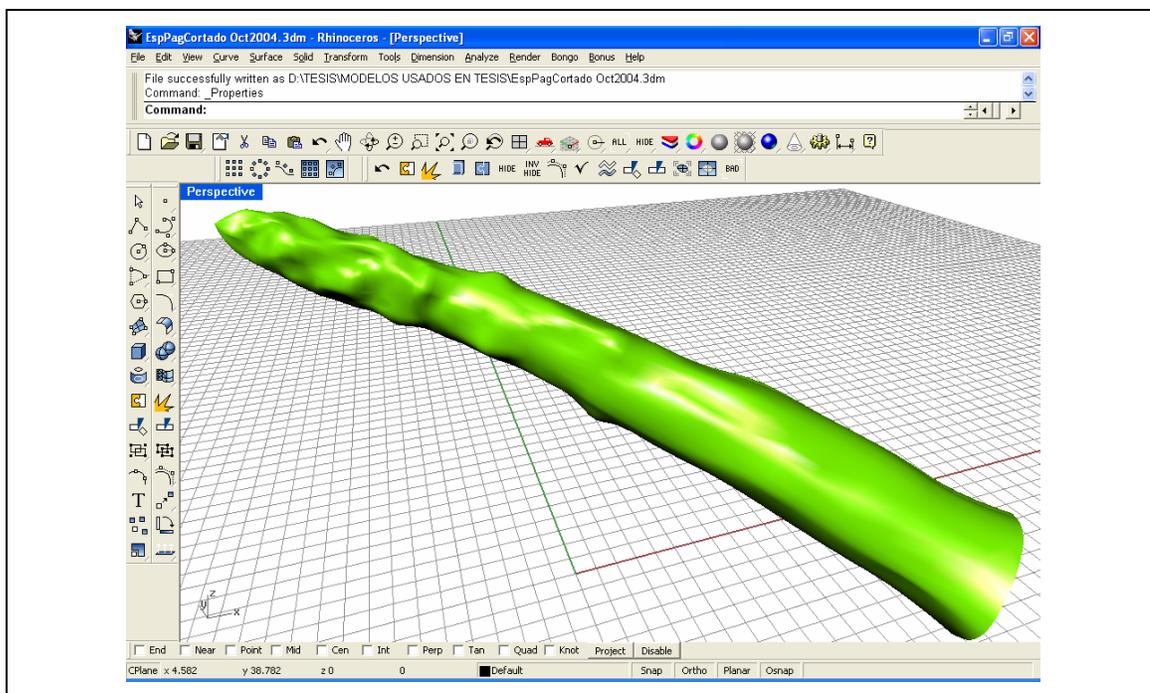


**FIGURA 36. Matriz de puntos 3D de un espárrago capturada en el software Rhinoceros®.**

**3.3.4.4 Generación del modelo digital 3D.** Una vez capturados todos los puntos de la malla, el software modelador Rhinoceros® reconstruye la superficie que se adecua a todos los puntos en coordenadas cartesianas 3D ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) ingresadas por el brazo digitalizador, y realiza su representación geométrica digital, como se aprecia en la FIGURA 37 y en la FIGURA 38. La representación para todas las formas y objetos que se realizan en el software modelador Rhinoceros®, es en base a curvas NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*) (Ver 2.2.1.1.3) lo cual hace que el modelo generado sea fácil de analizar por algoritmos que dicho software posee, pudiéndose obtener datos como el volumen y área superficial del modelo, realizar ajustes al modelo como cortes, cierres, deformaciones, etc. en pro de obtener un modelo factible de manejar por el software de simulación que se verá en el siguiente punto. En esta etapa se debe cuidar de no provocar cambios muy drásticos en la geometría, si es que tuvieran que hacerse, con el fin de mantener el modelo lo más fiel posible a su original.



**FIGURA 37. Modelo 3D de un espárrago digitalizado en el software Rhinoceros®.**

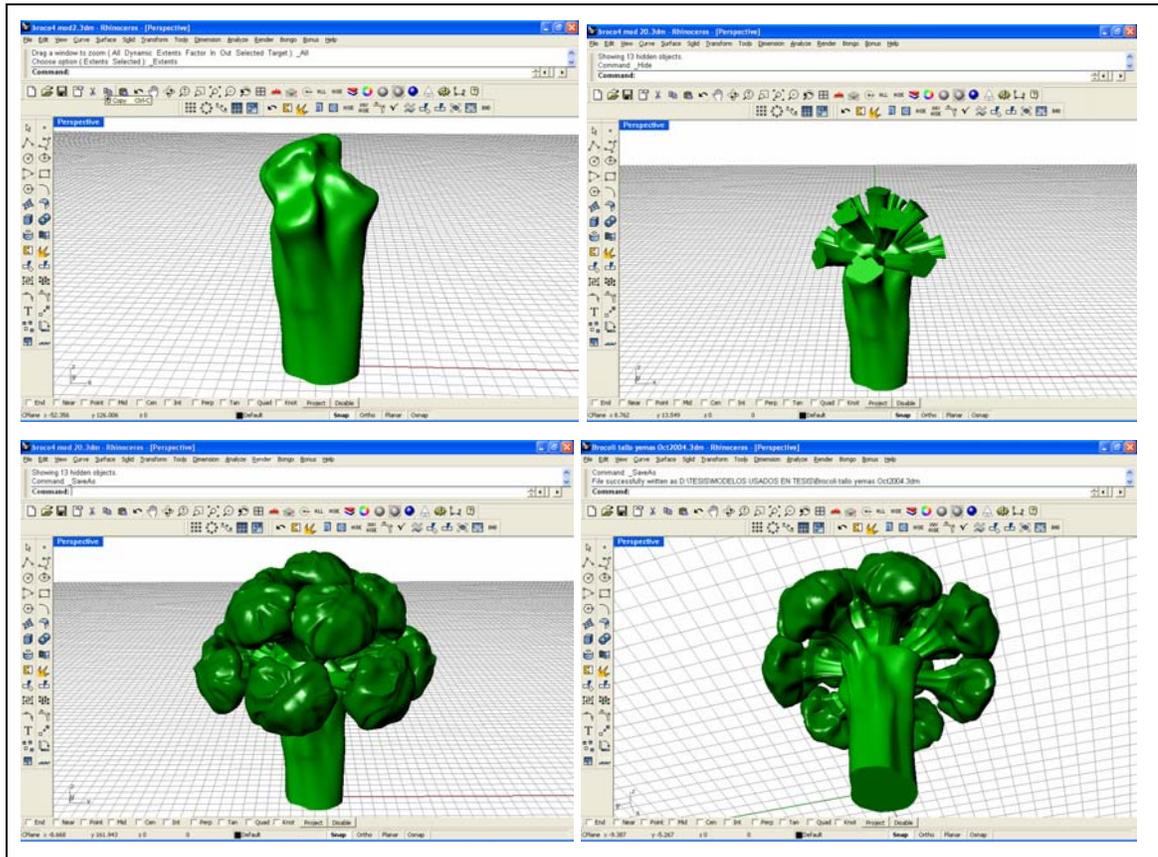


**FIGURA 38. Acercamiento de un modelo 3D de un turión de espárrago en el software Rhinoceros®.**

**3.3.4.5 Modelado 3D.** Un turrón de espárrago no presenta grandes complejidades en su geometría, por lo que se puede obtener fácilmente su modelo digital, como se aprecia en la FIGURA 38. Sin embargo, y como ya se mencionó en 3.3.4.1, para el caso de los brócolis y camarones sí se presentaron complejidades en su forma que no fueron factibles de ser captadas ni en las réplicas de yeso ni por el método de digitalización. Es por esto que se debió recurrir al modelado computacional 3D de aquellas partes faltantes, para su posterior análisis térmico.

El software Rhinoceros® posee numerosas herramientas para editar modelos 3D, permitiendo realizar virtualmente cualquier tipo de modificación a curvas, superficies y sólidos, como mover, copiar, rotar, escalar, hacer cortes, dividir y unir sólidos, suavizar bordes, deformar completamente por medio de puntos de control, etc. El único límite es la imaginación del artista digital.

- **Brócoli.** Como ya se mencionó, se obtuvieron réplicas de yeso de sólo el tallo del florete. Estos tallos de yeso fueron digitalizados y posteriormente al modelo 3D se le fueron agregando pedúnculos y yemas florales mediante modelación 3D, como se observa en la FIGURA 39 y en más detalle en el ANEXO 2. Así se logró obtener modelos cuya fisonomía se acercaba más a la realidad.



**FIGURA 39. Proceso de modelación 3D de un florete de brócoli en Rhinoceros®.**

- **Camarón.** En este caso, se obtuvieron réplicas carentes de patas y antenas. Estas réplicas fueron digitalizadas y a estos modelos 3D sin detalles (FIGURA 40) se le agregaron patas y antenas mediante modelación 3D en Rhinoceros® (FIGURA 41).

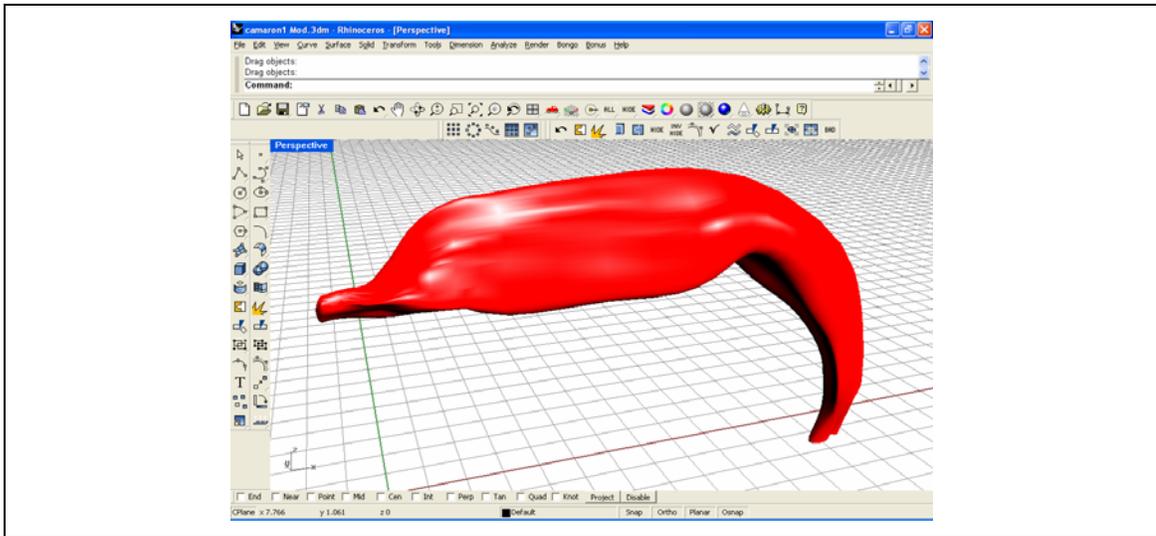


FIGURA 40. Modelo 3D sin detalles de un camarón en Rhinoceros®.

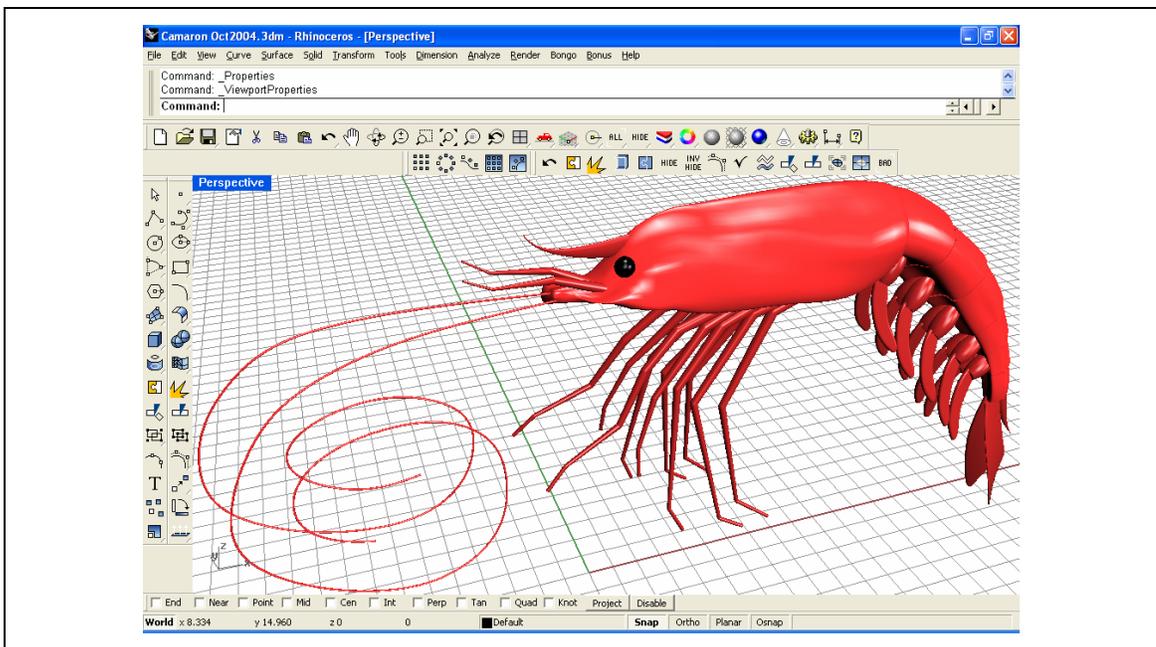
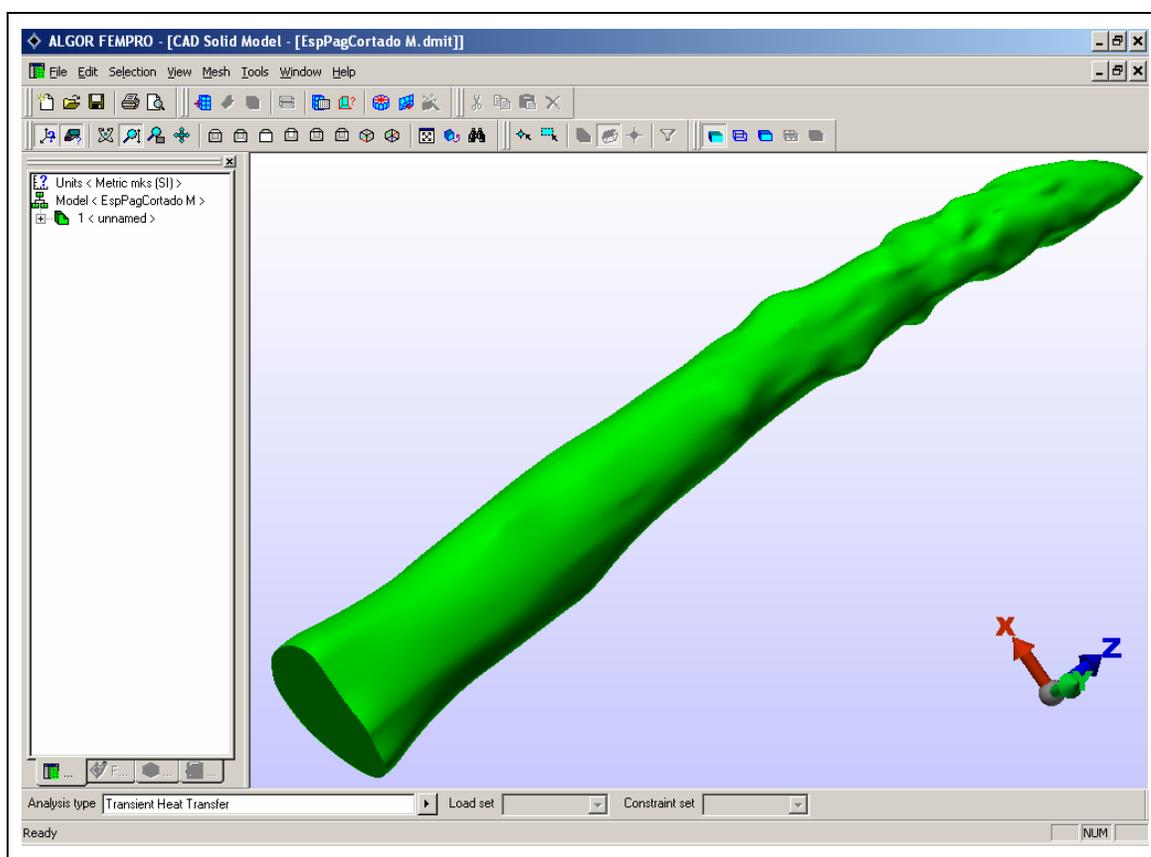


FIGURA 41. Modelo 3D detallado de un camarón modelado en Rhinoceros®.

**3.3.5 Intercambio CAD/CAE.** Esta es una etapa intermedia de comunicación entre dos *software* de ingeniería, donde el modelo **CAD** del alimento representado digitalmente en Rhinoceros® es guardado como un archivo tipo

“Rhino 3-D Model” (de extensión “.3dm”), y luego, mediante la función RHINOCEROS® IMPORT EXTENDER, este archivo es importado en su forma nativa directamente en el software **CAE** de análisis de transferencia de calor **ALGOR®**, manteniéndose intacta la información no sólo geométrica sino también del sistema de unidades, entre otros. Esta capacidad para importar archivos de Rhinoceros® directamente en ALGOR® asegura la integridad de los datos del modelo que a veces se sacrifica cuando se traduce la geometría a formatos universales como IGES o ACIS.

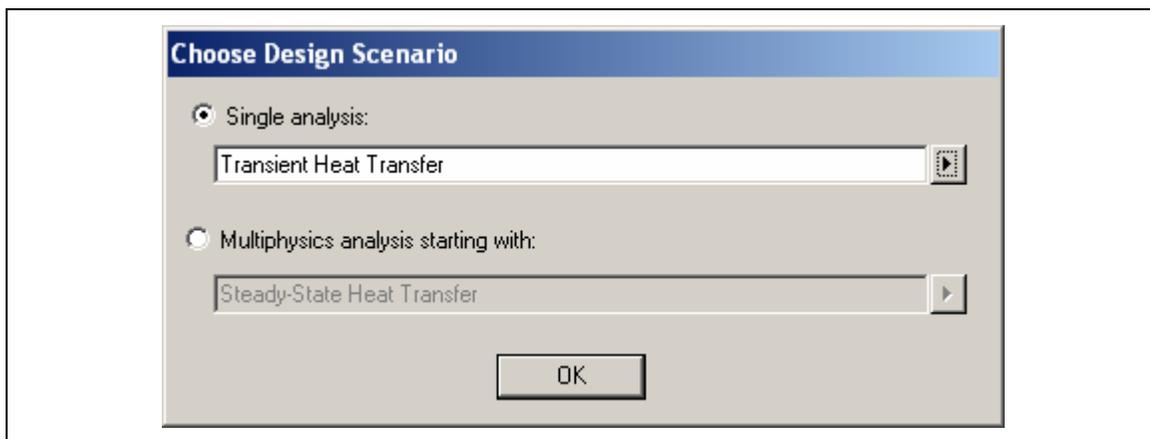


**FIGURA 42. Modelo 3D de un espárrago importado en el software ALGOR®.**

**3.3.6 Simulación del proceso térmico en ALGOR®.** En esta última etapa, el modelo digital del alimento es sometido a la simulación del tratamiento térmico en el software ALGOR®. El método que utiliza este software para la resolución

de los problemas es el **Método de Elementos Finitos**. Como se describió en 2.3 este método se divide en los pasos de pre-procesamiento, procesamiento, y post-procesamiento, los cuales fueron realizados en ALGOR® como sigue:

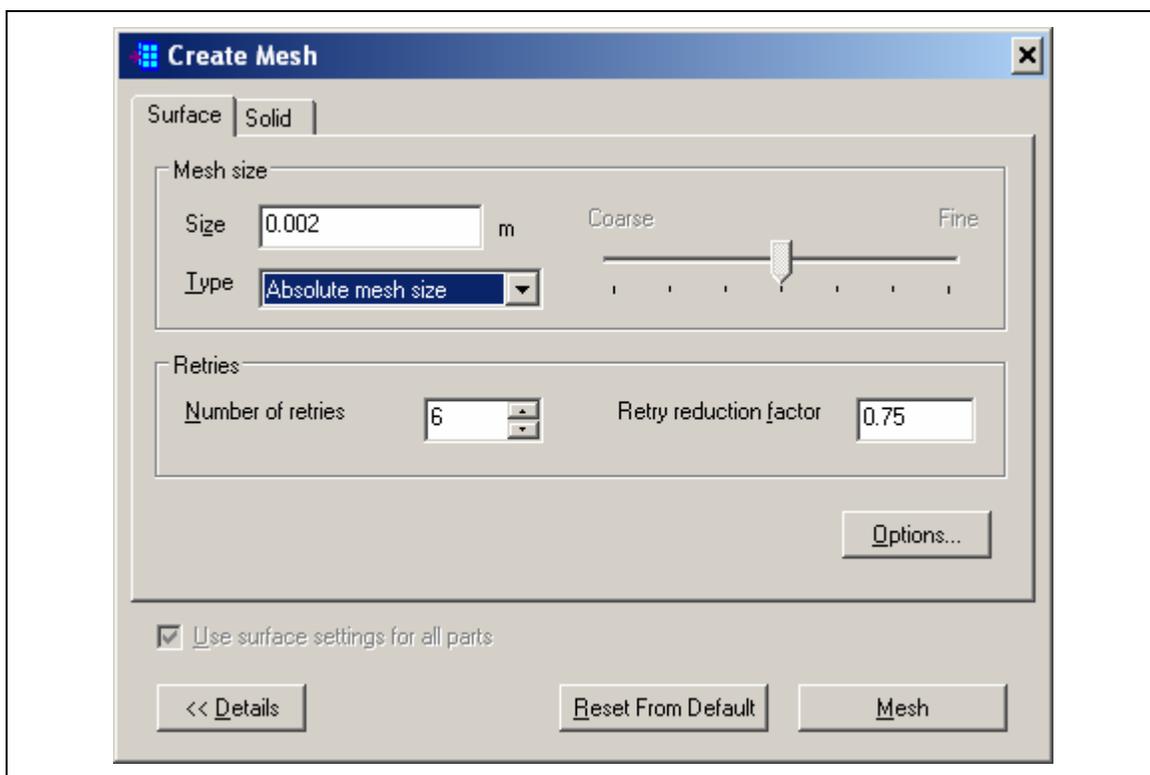
**3.3.6.1 Elección del escenario del diseño.** Una vez abierto el modelo, lo primero que ALGOR® pide es especificar si el tipo de análisis que se desea realizar es de transferencia de calor en estado estacionario o transiente (FIGURA 43). Ya que se desea conocer el historial tiempo/temperatura a lo largo de un proceso térmico, se elige la opción Transferencia de Calor Transiente.



**FIGURA 43.** Ventana de elección de escenario del diseño en ALGOR®.

**3.3.6.2 Generación de la malla (*mesh*).** Elegido el escenario, se debe crear la malla de elementos que discretizarán el dominio continuo del alimento para su análisis numérico. Este proceso de mallado es realizado en ALGOR® de forma automática, previo ingreso de la densidad de malla deseada, es decir, del tamaño promedio que se le dará a cada elemento. ALGOR® presenta dos formas de elegir el tamaño de la malla: una es en **porcentaje**, donde el generador de malla del software calcula automáticamente un tamaño de malla basado en el porcentaje ingresado multiplicado por el tamaño de malla por defecto (cuando el *slider* está en la mitad, indicando un 100%). La otra opción

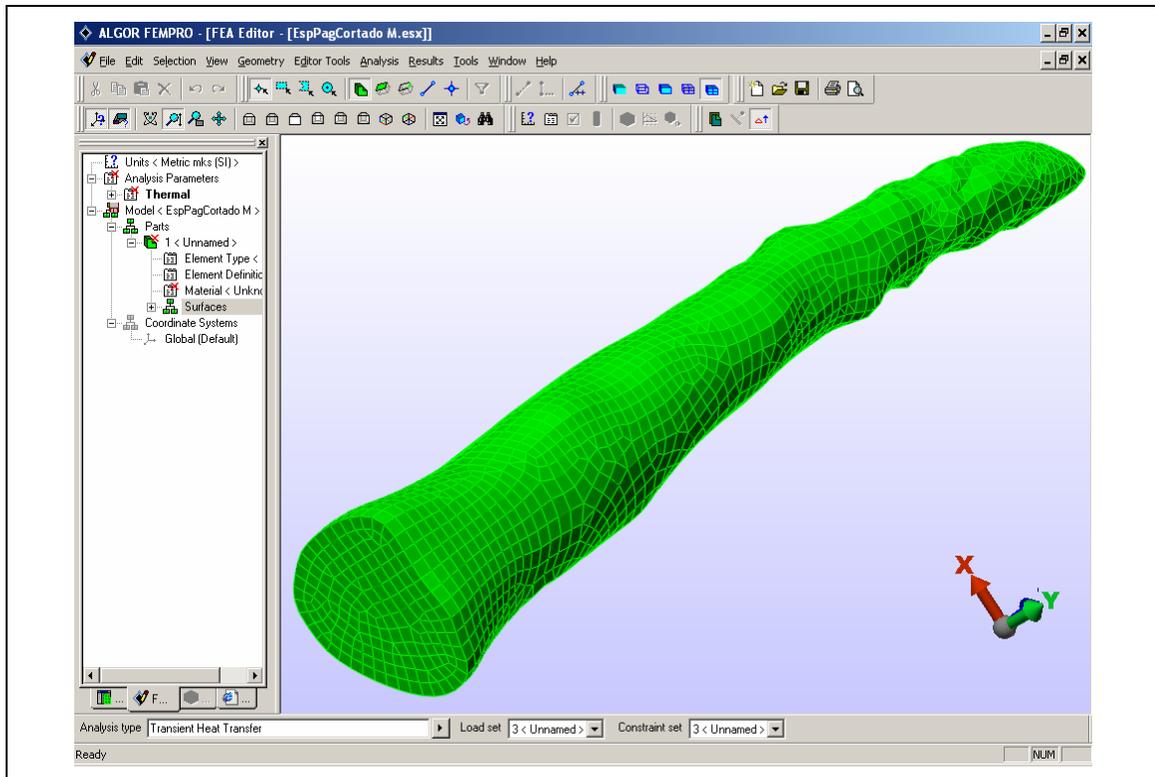
es ingresar el **tamaño absoluto de malla**, donde el generador de malla intentará hacer la malla sobre el modelo usando aproximadamente el tamaño de malla ingresado. El número ingresado aquí corresponderá a la longitud aproximada de los lados de los elementos (FIGURA 44).



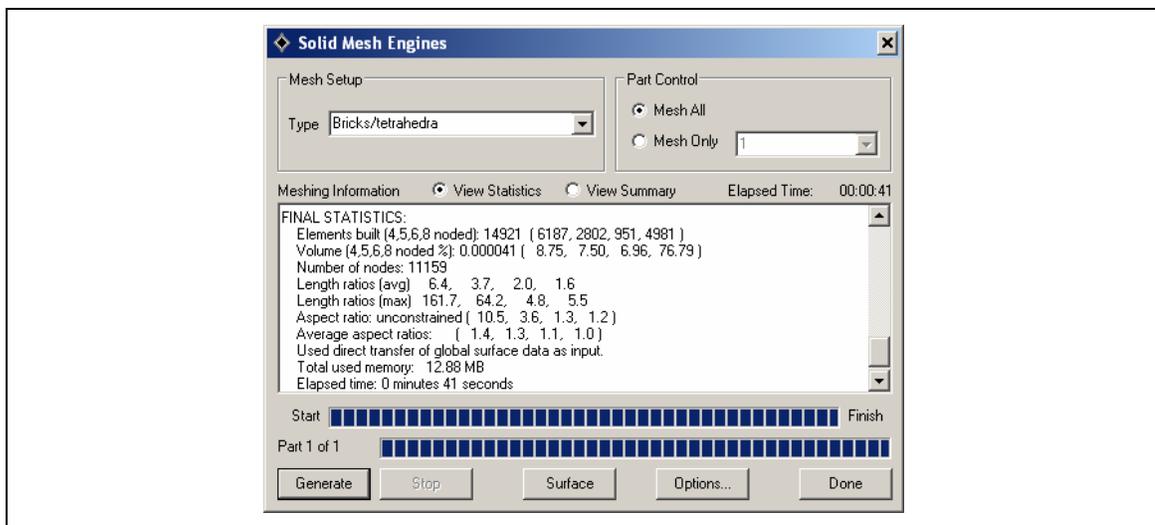
**FIGURA 44. Ventana de elección del tamaño de la malla en ALGOR®.**

Antes de crear el mallado del dominio 3D del alimento, se crea, primero, una **malla de superficie** (FIGURA 45), en donde se generan elementos 2D sólo en la superficie del modelo, para así tener una idea de cómo quedará la malla del sólido antes de generarla. También se debe elegir qué tipo de elementos deseamos en la malla: sólo ladrillos, sólo tetraedros, o una mezcla de ellos. Por las razones descritas en 2.3.1.3 se eligió el método de mallado mixto “**Bricks/Tetrahedra**” (Ladrillos/Tetraedros), presentado en ALGOR® por defecto, ya que genera una malla de la más alta calidad y con el menor número

de elementos. Toda esta generación de elementos es realizada por ALGOR® en forma automática (FIGURA 46).



**FIGURA 45. Malla de superficie de un modelo de espárrago en ALGOR®.**



**FIGURA 46. Generación de elementos en ALGOR®.**

**3.3.6.3 Pruebas de convergencia.** En un Análisis de Elementos Finitos mientras más fina se haga la malla, es decir, más pequeño el tamaño de los elementos (y por lo tanto, mayor número de estos), se generará una solución cada vez más aproximada, pero el tiempo computacional aumenta (a veces dramáticamente) y puede eventualmente hacerse irrealista de calcular. Para conocer qué tamaño de elementos sería el adecuado, se procedió a realizar pruebas de convergencia, en donde un mismo modelo se somete a simulaciones en las que se va disminuyendo el tamaño de los elementos para así ir chequeando si la solución cambia apreciablemente. Si la solución cambia significativamente, puede ser un signo de que el tamaño de los elementos usados fue muy grande, y el cálculo tendría que repetirse usando un tamaño más pequeño de elementos. Este proceso se repite hasta que la solución ya no cambie apreciablemente a medida que se disminuya el tamaño de los elementos. En este punto, se asume que la solución ha convergido.

La prueba de convergencia que se realizó en la presente investigación fue aplicada en uno de los espárragos digitalizados y las variables a considerar en este experimento fueron las siguientes:

**a) Tamaño de la malla:** se eligieron 3 densidades de malla que se detallan en el CUADRO 5.

**CUADRO 5. Tamaños de malla elegidos para las pruebas de convergencia.**

Tamaño de la malla en porcentaje	Tamaño absoluto de la malla
30%	0,002482 m
20%	0,001655 m
10%	0,000827 m

**b) Tamaño del paso de tiempo:** Este es el tamaño (en segundos) de cada paso de cálculo, o mejor dicho, el tamaño del intervalo de tiempo en que el software realizará los cálculos. Dado que un análisis transiente es una

integración numérica, los resultados serán más exactos mientras más pequeño sea el paso de tiempo. También, algunos modelos pueden oscilar en las temperaturas del inicio cuando la carga aplicada es alta (algo similar a las vibraciones producidas en un modelo de tensiones cuando es impactado por una fuerza en el tiempo cero). Esto se conoce como inestabilidad numérica.

Se analizaron 4 tamaños de paso de tiempo: 1; 0,8; 0,5 y 0,1 segundos. Para todos los análisis hubo parámetros comunes del modelo, como son sus propiedades térmicas y físicas, que se detallan en el CUADRO 6.

**CUADRO 6. Parámetros del modelo comunes a todos los análisis.**

<b>Nombre del modelo</b>	Espárrago 03
<b>Volumen</b>	22,088798 (+/- 4.6e-007) cm <sup>3</sup>
<b>Área Superficial</b>	69,51995 (+/- 0.00043) cm <sup>2</sup>
<b>Temperatura nodal por defecto (inicial)</b>	20°C
<b>Tipo de elementos</b>	Ladrillo (Brick) Térmico
<b>Modelo del material</b>	Isotrópico
<b>Densidad másica</b>	1019,9 kg/m <sup>3</sup>
<b>Conductividad térmica</b>	0,583 J/(s*°C*m <sup>2</sup> )
<b>Calor específico</b>	3994,5 J/(kg*°C)
<b>Coefficiente convectivo</b>	1000 J/(s*°C*m <sup>2</sup> )
<b>Temperatura del medio</b>	100°C
<b>Tiempo de proceso</b>	200 s

Los resultados y parámetros que se consideraron y compararon para la determinación del mallado óptimo fueron:

- el tiempo en que el punto (nodo) de más lento calentamiento llega a 75 °C (“t<sub>75</sub>”),
- el gasto computacional (tiempo computacional ocupado (“t<sub>T</sub>”))
- espacio ocupado en el disco duro (“HDD”) de la simulación.

El diseño experimental y los resultados para el análisis de convergencia se muestran en el CUADRO 7.

**CUADRO 7. Resultados de las pruebas de convergencia.**

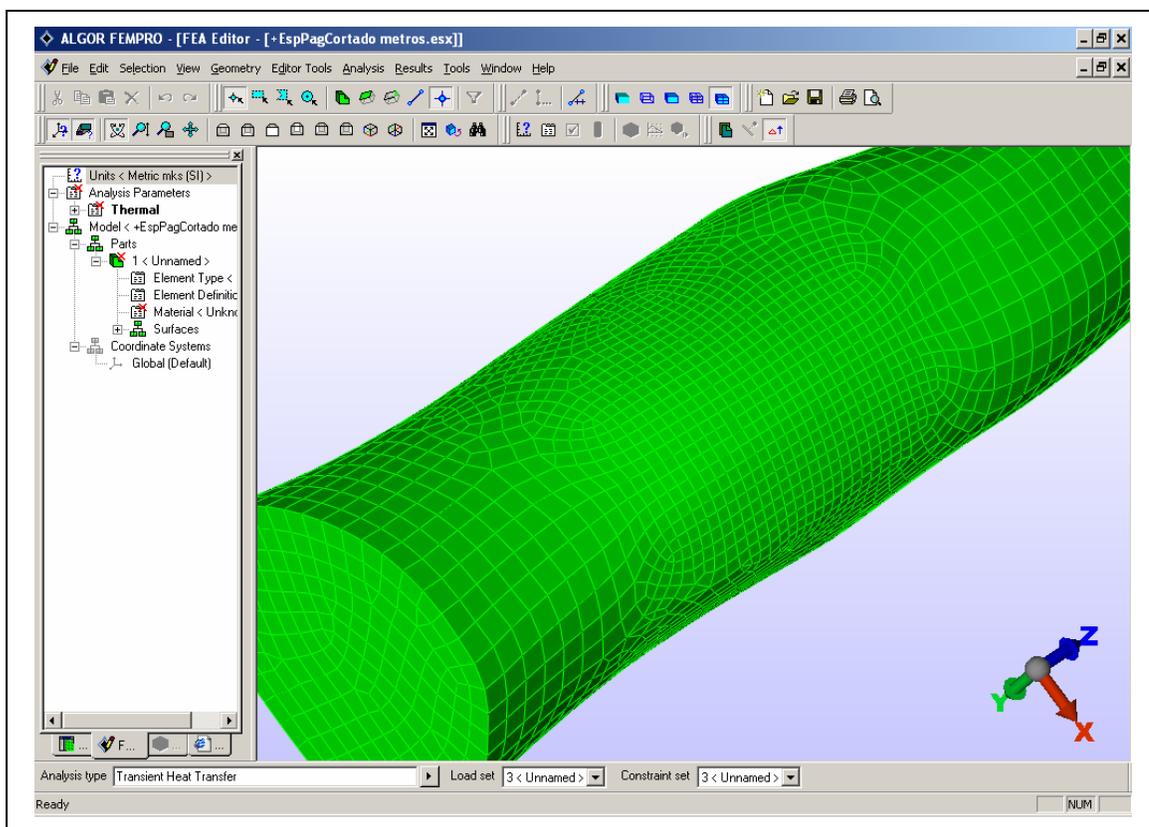
Tamaño elemento	Nº elem. (Nº nodos)	Nodo más frío		Tamaño del Paso de Tiempo			
				1 s	0,8 s	0,5 s	0,1 s
30% 2,48 mm	4794 (2466)	1913	Código	03-m30p1	03-m30p08	03-m30p05	03-m30p01
			t <sub>T</sub>	8,1 min	10,4 min	16,6 min	114,6 min
			HDD	82,7 MB	97,3 MB	140,9 MB	605,5 MB
			t <sub>75</sub>	155 s	155,2 s	154,5 s	154 s
20% 1,65 mm	13773 (6665)	5531	Código	03-m20p1	03-m20p08	03-m20p05	03-m20p01
			t <sub>T</sub>	29,4 min	38,9 min	52,2 min	~ 5 h
			HDD	233,6 MB	274,4 MB	396,8 MB	1,70 GB
			t <sub>75</sub>	155 s	155,2 s	154,5 s	154,2 s
10% 0,82 mm	103730 (46655)	42362	Código	03-m10p1	03-m10p08	03-m10p05	03-m10p01
			t <sub>T</sub>	~ 14,3 h	~20 h	~25 h	~6 d
			HDD	1.73 GB	~2 GB	~3 GB	~13 GB
			t <sub>75</sub>	154 s	-	-	-

Se puede observar en el CUADRO 7 que hay valores faltantes para la malla más fina (0,82 mm) con pasos de 0,8 segundos y menores. Esto se debe a que se estimaron para ellos tiempos de análisis superiores a 20 horas, no realizándose estas simulaciones por considerar que el sacrificio de un mayor costo de tiempo computacional no mejoraría la exactitud de los tiempos de proceso calculados.

De los valores analizados en el CUADRO 7 se puede inferir que la solución no cambia apreciablemente, no existiendo mayores diferencias en el tiempo en que el punto (nodo) de más lento calentamiento llega a 75 °C (“t<sub>75</sub>”) entre los diferentes mallados, encontrándose una diferencia máxima de 1 segundo, con un máximo de 155 segundos y un mínimo de 154 segundos.

Ya que la convergencia entre mallas es similar, se llegó a la convención de que se consideraría un mallado intermedio entre el de 20% y el de 10%, siendo por lo tanto el tamaño absoluto de malla a usar de **0,001 m (1 mm)**.

ALGOR® presenta la posibilidad de especificar “**puntos de refinamiento**” (“*Refinement points*”) en el modelo, donde en determinadas regiones se pueden generar elementos más pequeños (ver FIGURA 47). Estos puntos de refinamiento representan un procedimiento de mallado adaptivo (2.3.1.1.3) y se utilizan en aquellas áreas del modelo donde se presentan irregularidades severas en su superficie, como por ejemplo aristas y vértices agudos, evitando de esta forma problemas de inestabilidad numérica en los cálculos, lo que conduciría a errores en los resultados.

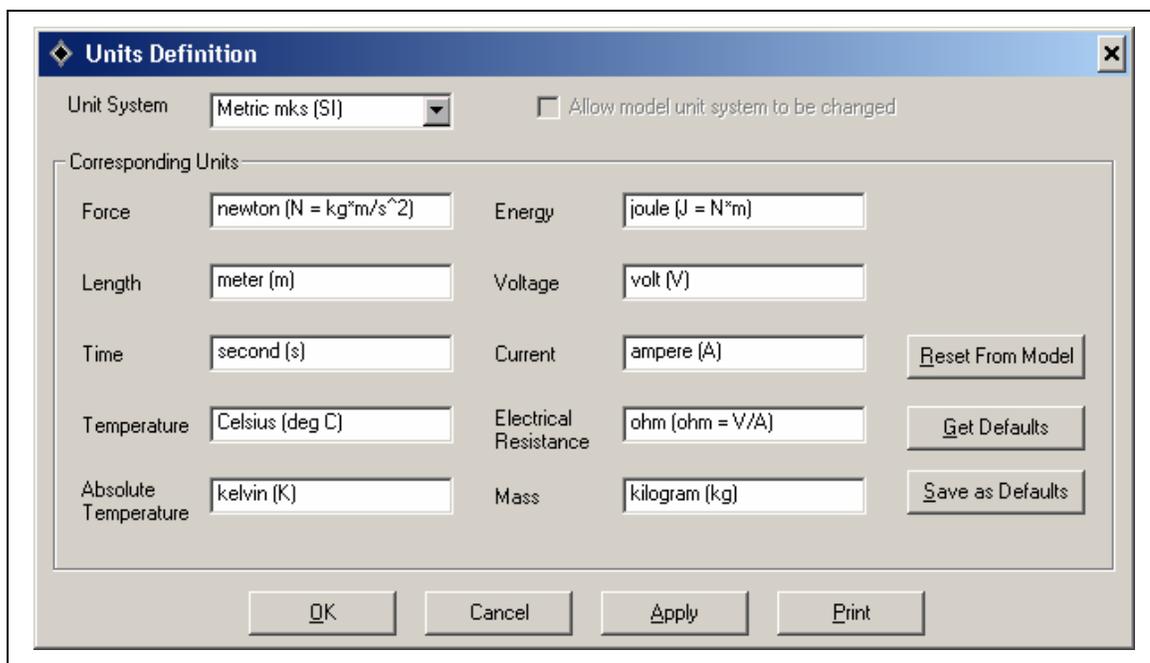


**FIGURA 47. Malla con refinamiento en un modelo de espárrago en ALGOR®.**

En cuanto al tamaño del paso de tiempo, se puede ver que tampoco hay diferencia entre ellos, por lo que se llegó a la convención de usar un paso de **1 segundo**.

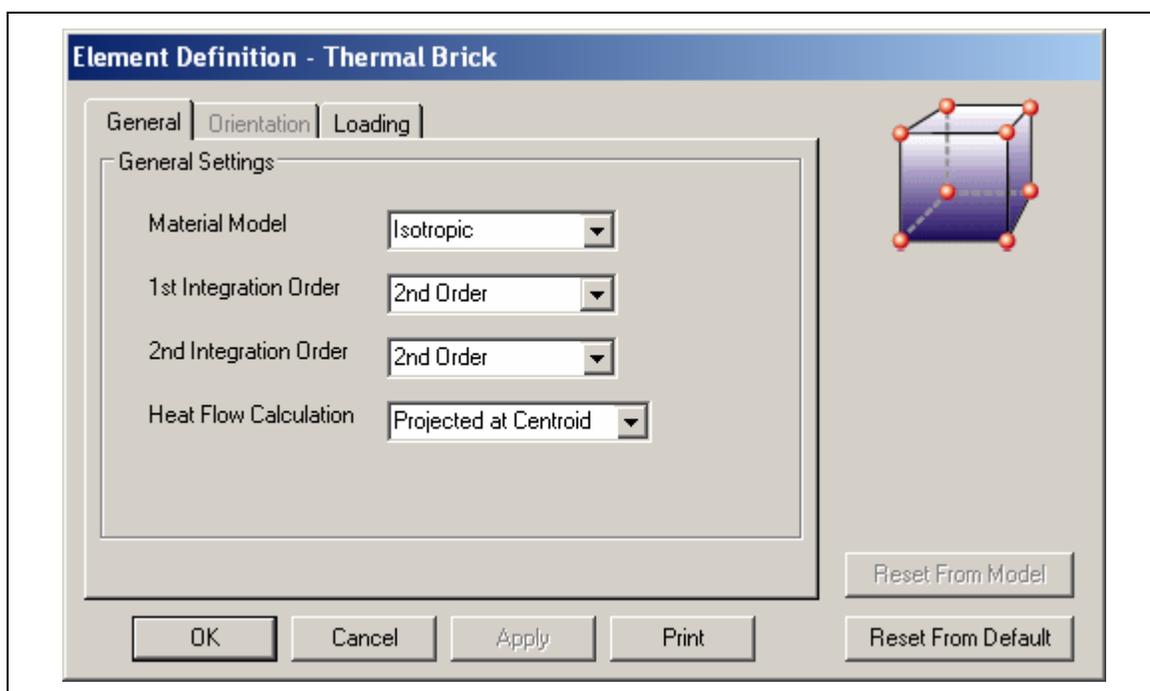
Una vez generada la malla se pasa a la sección **FEA Editor** de ALGOR® donde se ingresan todos los parámetros necesarios para realizar el análisis.

**3.3.6.4 Definición del sistema de unidades.** Cuando el archivo del modelo importado no posee información sobre sus unidades, se debe estipular con qué sistema de unidades se trabajará: Métrico mks (SI), Métrico cgs, Inglés (in), etc. (FIGURA 48). Gracias a la tecnología RHINOCEROS® IMPORT EXTENDER de ALGOR® este paso puede omitirse ya que el programa reconoce automáticamente el sistema de unidades del modelo. Sin embargo, si se desea, el sistema de unidades puede ser cambiado según se requiera.



**FIGURA 48.** Ventana de definición de unidades en ALGOR®.

**3.3.6.5 Definición de los elementos.** Se debe especificar en ALGOR® si los elementos tendrán un comportamiento ya sea Isotrópico u Ortotrópico (ver 2.3.2). Para los análisis realizados en la presente investigación siempre se especificó un modelo de material **Isotrópico**, por la relativa homogeneidad estructural observada en los alimentos utilizados.



**FIGURA 49.** Ventana de definición de elementos en ALGOR®.

**3.3.6.6 Especificación del material de los elementos.** Es ahora cuando se ingresan las propiedades del alimento: **Densidad másica ( $\rho$ )**, **Conductividad térmica ( $K$ )**, y **Calor específico ( $C_p$ )** (FIGURA 50). Ellas fueron determinadas por medio del software **FoodProperty Pro 1.0** para predecir las propiedades a partir de su composición proximal. La composición de cada alimento se extrajo de WATT y MERRILL (1975) y se muestra en el CUADRO 8.

Para que la composición sea representativa de los alimentos utilizados en la presente investigación, se midió el contenido de humedad de una muestra de cada alimento (método gravimétrico; AOAC, 1988) y luego se ponderó este valor de humedad con los porcentajes reportados en bibliografía. En el ANEXO 1 se detalla un ejemplo de cálculo para el porcentaje de proteínas de los espárragos. La composición entonces ingresada en FoodProperty se detalla en el CUADRO 9 y las propiedades termofísicas de los alimentos entregadas por este *software* se detallan en el CUADRO 10.

#### CUADRO 8. Composición de los alimentos utilizados, según bibliografía.

ALIMENTO	Composición (%)					
	Humedad	Proteínas	Lípidos	Carbohidratos	Fibra	Cenizas
Espárrago	91,7	2,5	0,2	4,3	0,7	0,6
Brócoli	89,1	3,6	0,3	4,4	1,5	1,1
Camarón	78,2	18,1	0,8	1,5	0,0	1,4

FUENTE: WATT y MERRILL (1975)

#### CUADRO 9. Composición de los alimentos ingresada en FoodProperty.

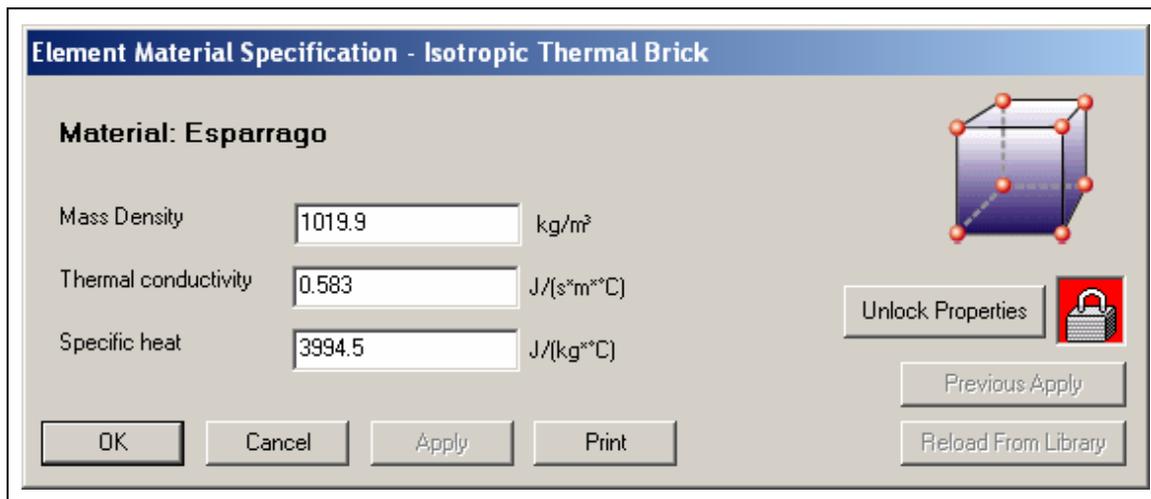
ALIMENTO	Composición (%)					
	Humedad*	Proteínas	Lípidos	Carbohidratos	Fibra	Cenizas
Espárrago	93,6	1,93	0,15	3,32	0,54	0,46
Brócoli:						
- Tallo	91,59	2,78	0,23	3,39	1,16	0,85
- Yemas fl.	89,03	3,62	0,30	4,43	1,51	1,11
Camarón	78,2	18,1	0,8	1,5	0,0	1,4

\* Método gravimétrico (AOAC, 1988)

#### CUADRO 10. Propiedades termofísicas de los alimentos arrojadas por FoodProperty.

ALIMENTO	Propiedad*		
	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad Térmica (W/m K)	Calor Específico (J/kg K)
Espárrago	1017,1	0,587	4019,5
Brócoli:			
- Tallo	1023,5	0,581	3971,6
- Yemas florales	1032,2	0,574	3909,2
Camarón	1056,6	0,536	3689,5

\* a 20°C.



**FIGURA 50. Ventana de especificación del material de los elementos en ALGOR®.**

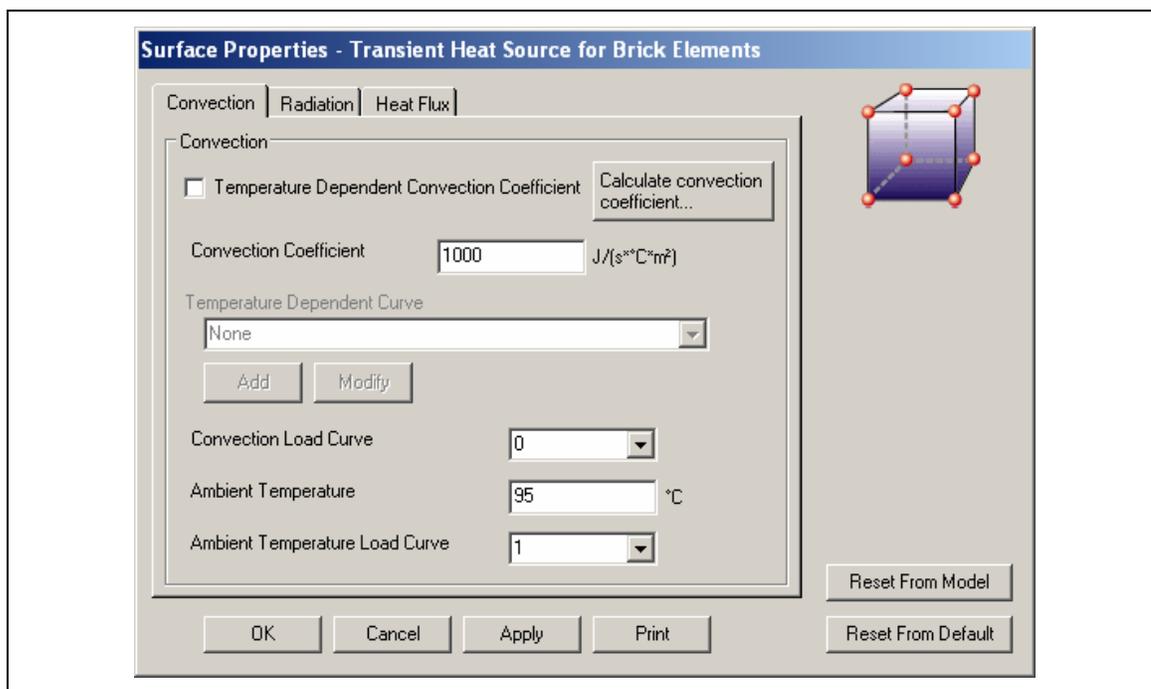
Para la presente investigación se consideró las propiedades termofísicas constantes con respecto a la temperatura.

**3.3.6.7 Especificación de las cargas de superficie.** Aquí se debe seleccionar el área del modelo en donde se aplicarán las cargas, es decir la(s) superficie(s) por donde se realizará la transferencia de calor por convección. Como los alimentos utilizados en el tratamiento de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento son completamente sumergidos en el agua, se seleccionan todas aquellas superficies externas del modelo que estén en contacto con ella. Para esa(s) superficie(s) se define el **Coefficiente Convectivo de Transferencia de Calor ( $h$ )** y la **Temperatura del medio** (FIGURA 51):

- Se definieron dos coeficientes convectivos, uno para la etapa de calentamiento y otro para la de enfriamiento. Debido a esta variación, se debió especificar que se usaría una curva de carga (**load curve**) para él, es decir una

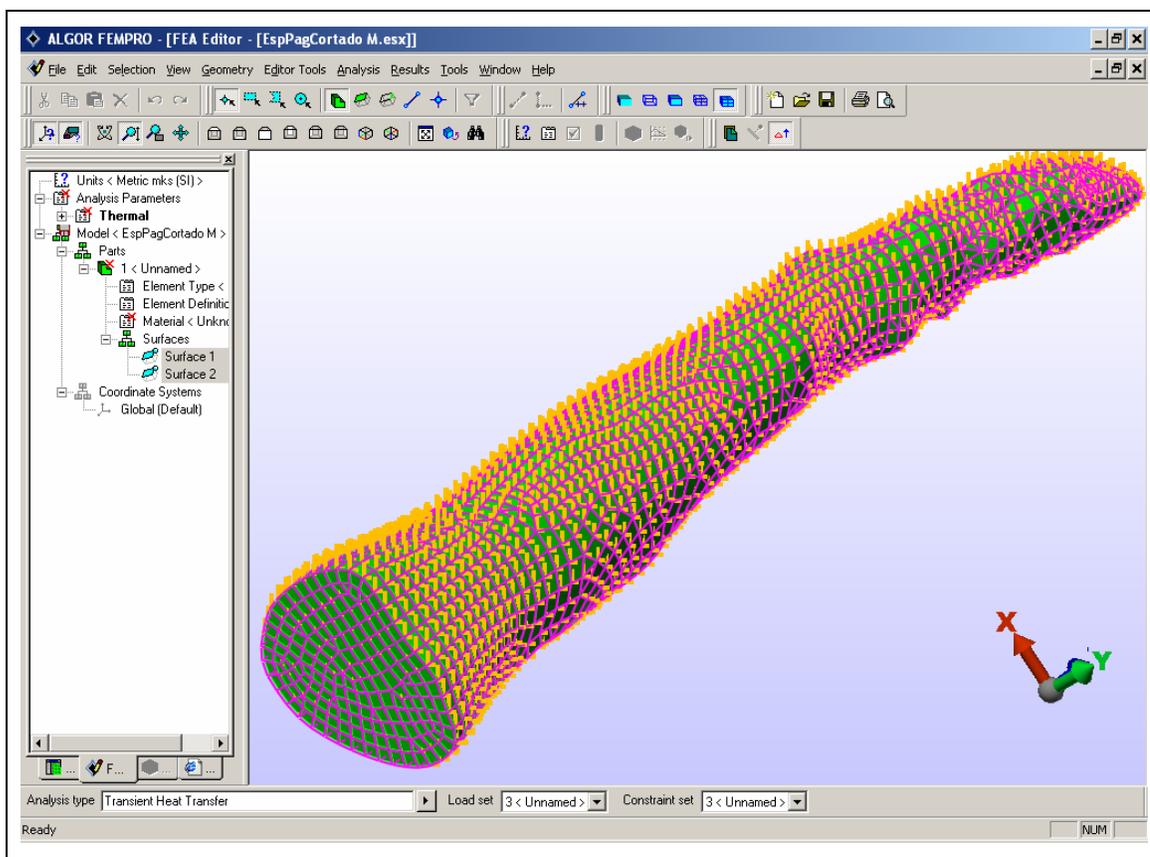
curva que represente su variación durante el tratamiento. Esto se describe en el punto siguiente junto con el método de estimación de estos coeficientes.

- El mismo caso ocurrió para la temperatura del medio, registrada mediante las termocuplas tipo T desmontables. Como esta temperatura también presenta una variación durante el tratamiento, desde un medio caliente a uno más frío, también se debió especificar que se usaría una curva de carga (**load curve**), es decir una curva que representase esta variación en la temperatura del medio. Esto también se describe en el punto siguiente.



**FIGURA 51. Ventana de propiedades de superficie en ALGOR®.**

Una vez aplicadas las cargas en las superficies, en los nodos de éstas se pueden apreciar unos pequeños iconos con forma de "L" y de color naranja (FIGURA 52) indicando que en esos nodos se han aplicado cargas (*loads*).



**FIGURA 52. Superficies con cargas aplicadas en un modelo de espárrago en ALGOR®.**

**3.3.6.8 Estimación del Coeficiente convectivo de transferencia de calor.** Los valores de los coeficientes convectivos tanto para el hidrocalentamiento como para el hidrogenfriamiento de cada uno de los productos evaluados (espárragos, brócolis y camarones) totalmente sumergidos en el medio acuoso, fueron determinados en base a las ecuaciones adimensionales reportadas por DÍAZ (2000) y que se muestran en 2.1.4.2.3. Los números de Nusselt ( $Nu$ ) bajo régimen de convección natural y tanto para la etapa de hidrocalentamiento como de hidrogenfriamiento, fueron calculados para cada caso. El valor de  $h$  se obtuvo entonces despejando en la ecuación de Nusselt (2.12), quedando:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (3.6)$$

Para utilizar las ecuaciones de DÍAZ (2000) y para el cálculo de  $D$  (diámetro equivalente) fue necesario hacer el supuesto de que el área superficial del alimento de forma irregular compleja (dada por el modelo digital 3D) es equivalente al área superficial de una geometría regular similar. Es por esto que la geometría de los espárragos y camarones se consideró equivalente a la de un **cilindro infinito**, mientras que la de los brócolis se consideró equivalente a la de una **esfera**. Los despejes de  $D$  para ambos casos se muestran a continuación:

Para espárragos y camarones (cilindro infinito):

$$\begin{aligned} A_{\text{superficial alimento}} &\equiv A_{\text{superficial cilindro infinito}} \\ &= 2 \pi r H \\ &= \pi D H \\ \text{despejando } D &= \frac{A_{\text{superficial alimento}}}{\pi H} \end{aligned}$$

Para brócolis (esfera):

$$\begin{aligned} A_{\text{superficial alimento}} &\equiv A_{\text{superficial esfera}} \\ &= 4 \pi r^2 \\ &= 4 \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \\ \text{despejando } D &= \sqrt{\frac{A_{\text{superficial alimento}}}{\pi}} \end{aligned}$$

Un ejemplo de cálculo de la obtención de este valor se encuentra en el ANEXO 3 y los valores de  $h$  obtenidos se muestran en el CUADRO 12. Los ANEXOS 5 y 6 muestran en detalle los parámetros obtenidos para la obtención de  $h$ .

**3.3.6.9 Ingreso de los parámetros del análisis.** En esta sección se especifican todos los parámetros propios del análisis a realizar:

- En primer lugar se especifica el tamaño del intervalo de tiempo en que se desea que el software realice cálculos, intervalo conocido como “paso de tiempo”, y la cantidad de estos intervalos, lo que determinará la duración (en segundos) del proceso simulado, además del intervalo en que se desea que el software arroje resultados (FIGURA 53). Los parámetros ingresados se detallan en el CUADRO 11.

Como el tamaño del paso de tiempo se definió de 1 segundo, el número de pasos de tiempo debió ser 600, para reflejar el tiempo total de tratamiento de 600 segundos (5 minutos de calentamiento y 5 minutos de enfriamiento). Dicho de otra forma, el producto del tamaño del paso de tiempo por el número de pasos de tiempo da la duración total del proceso.

**CUADRO 11. Parámetros del evento comunes a todos los análisis en ALGOR®.**

<b>Número de pasos de tiempo</b>	600
<b>Tamaño del paso de tiempo (s)</b>	1
<b>Intervalo de salida</b>	1

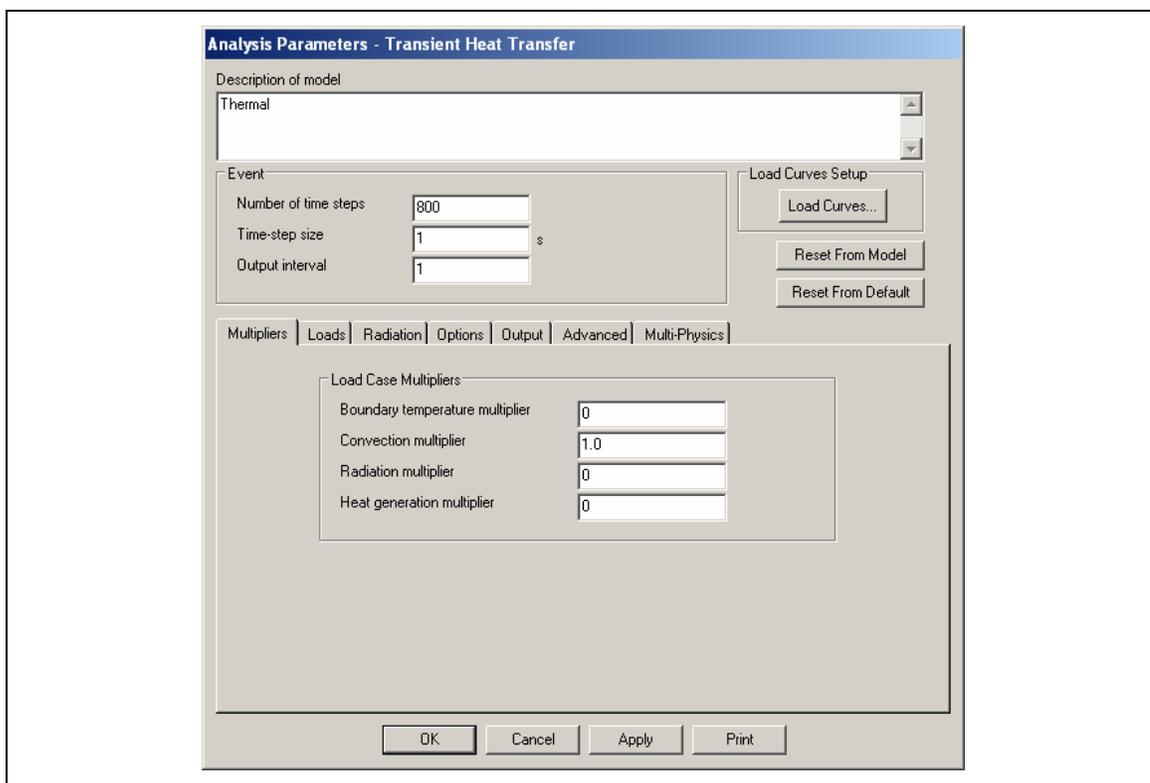
- En segundo lugar, y como se mencionó en 3.3.6.7, se definen las **curvas de carga (load curves)**, que representan las variaciones de las cargas durante el proceso simulado (FIGURA 54). Para el tratamiento aplicado a los alimentos se definieron 2 curvas de carga: una que representó la variación de la **temperatura del medio** (reflejando aquella registrada experimentalmente) y otra la variación del **coeficiente convectivo**, valores que se detallan en el CUADRO 12.

- Finalmente se ingresa la Temperatura inicial en que se encuentra el alimento (llamada “Temperatura nodal por defecto”), ingresándose la misma registrada experimentalmente para cada uno de ellos en el tiempo cero, valores que se muestran en el CUADRO 12.

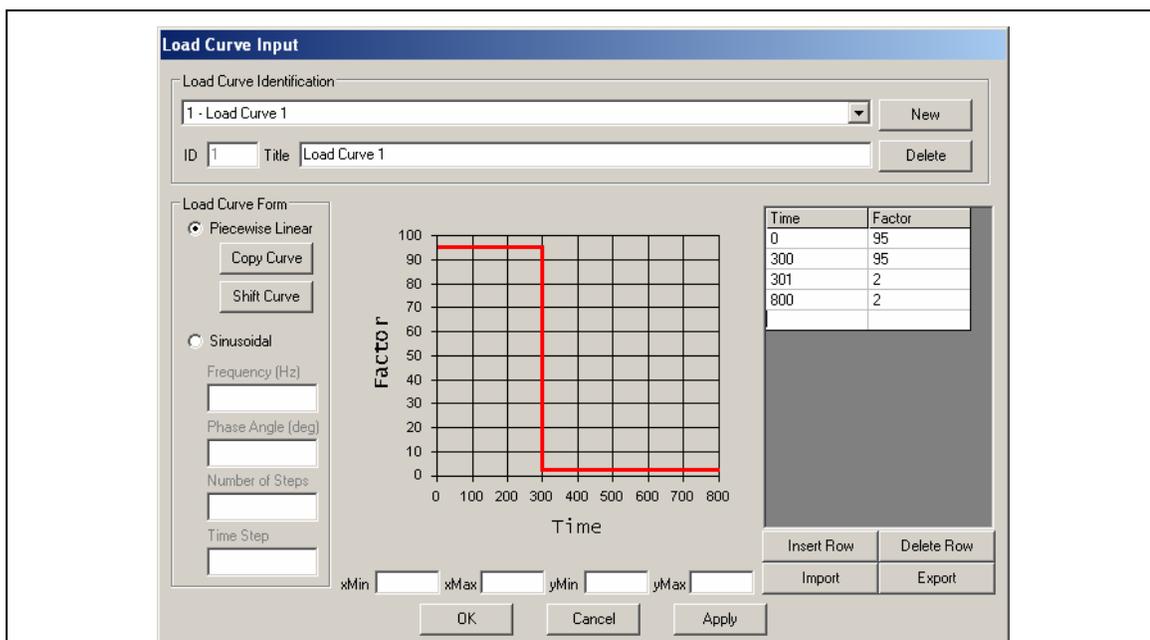
En esta misma ventana, en la paleta “Options” (FIGURA 55) se puede especificar qué solucionador (“*solver*”) va a usar ALGOR® para realizar el análisis. Por defecto, ALGOR® ofrece el **Sparse** y es el elegido para la presente investigación por los motivos dados en 2.3.4.

**CUADRO 12. Condiciones de frontera aplicadas a los alimentos en la simulación.**

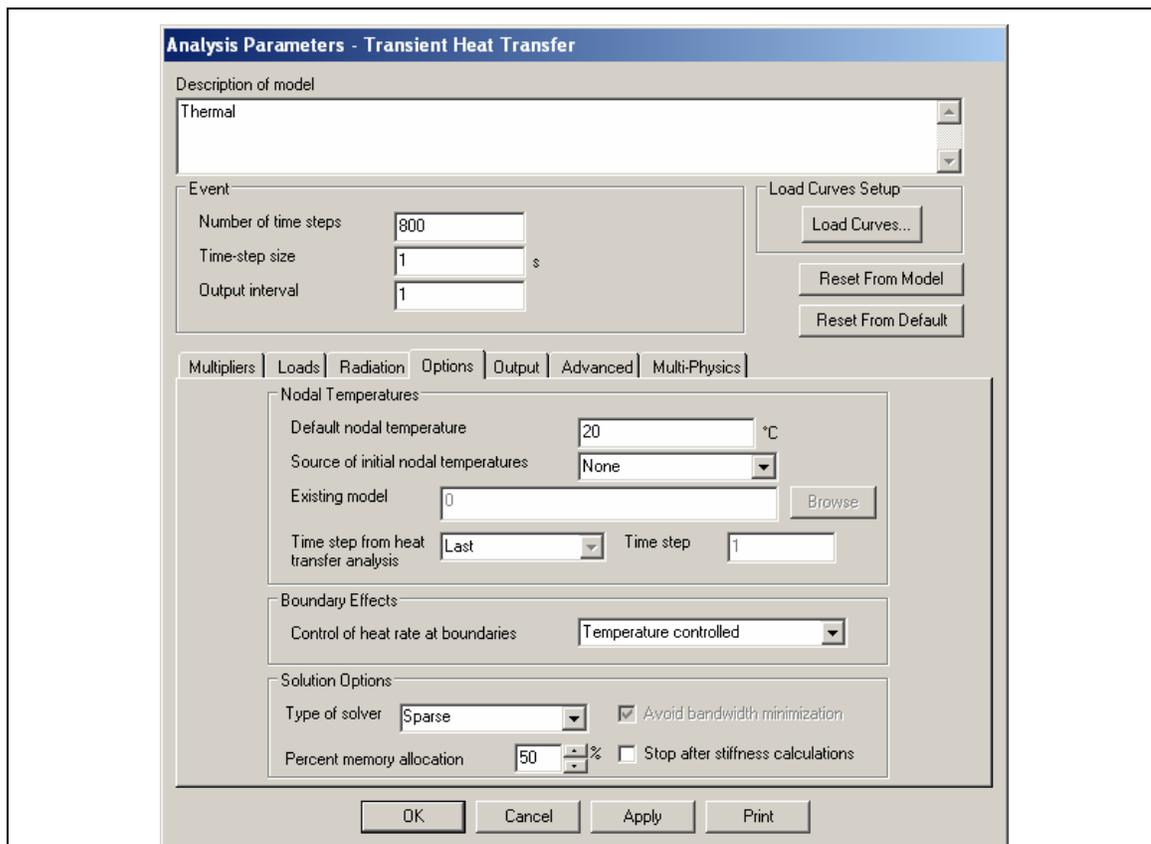
Alimento	Código	Temperatura Inicial (°C)	Hidrocalentamiento		Hidroenfriamiento	
			Coefficiente Convectivo ( $W/m^2 K$ )	Temperatura medio (°C)	Coefficiente Convectivo ( $W/m^2 K$ )	Temperatura medio (°C)
Espárrago	1	20,4	1375,2	94,2	343,3	3,7
	2	20,1	1390,6	94,2	342,3	3,7
	6	19,9	1369,3	94,2	336,5	3,7
Brócoli	2	18,1	809,4	93,0	269,7	2,3
	3	20,1	812,1	93,0	268,7	2,3
	4	17,9	833,1	93,0	273,5	2,3
Camarón	1	19,2	1334,5	94,3	322,7	3,5
	2	19,5	1334,8	94,3	326,2	3,5
	3	15,1	1402,4	93,8	283,5	3,3



**FIGURA 53. Especificación del número y tamaño de paso de tiempo y del intervalo de salida de resultados en ALGOR®.**

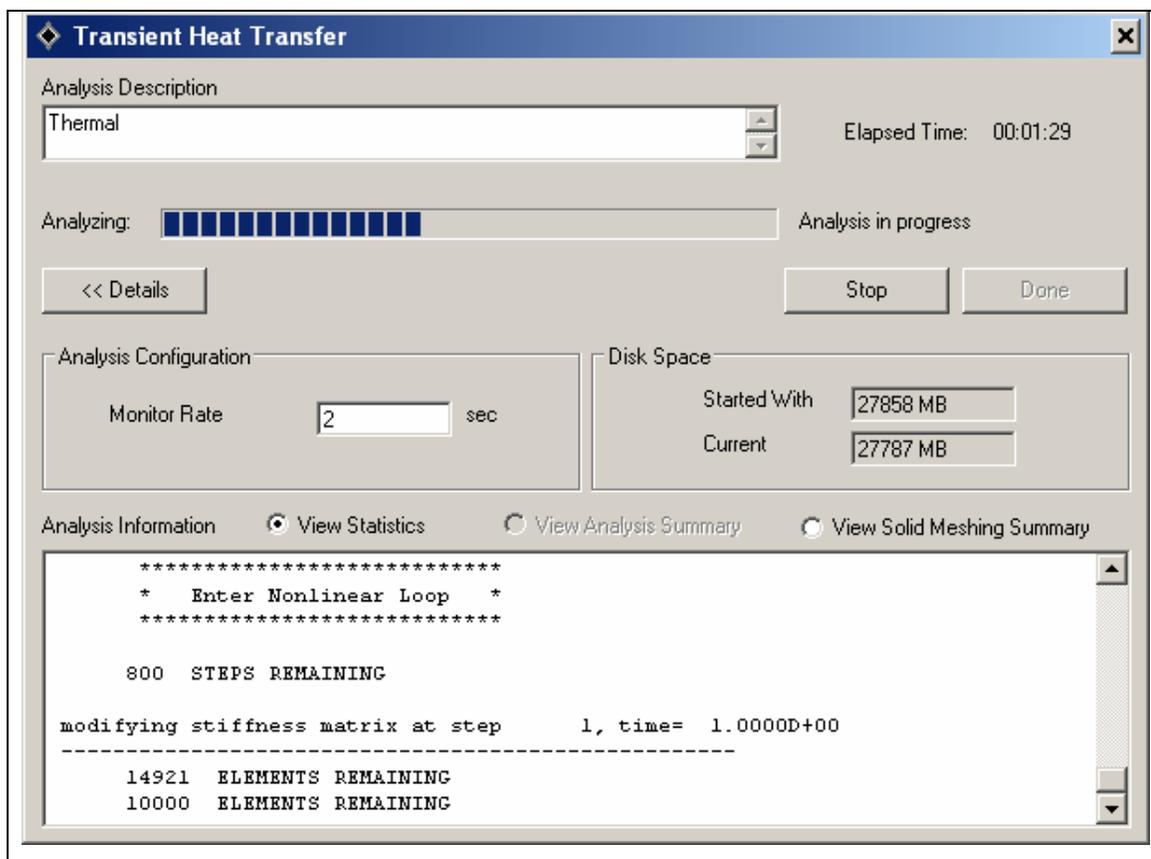


**FIGURA 54. Ingreso de una curva de carga de temperatura para el proceso hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en ALGOR®.**



**FIGURA 55. Ingreso de la temperatura nodal inicial y del solucionador en ALGOR®.**

**3.3.6.10 Análisis.** Teniendo todos los datos anteriores ingresados se procede a la ejecución del análisis o simulación. ALGOR® va mostrando el progreso de éste en una ventana (FIGURA 56) donde se pueden ir viendo detalles como el paso (*step*) en que se están realizando los cálculos, el tiempo transcurrido, el espacio que se va ocupando en el disco duro, etc. Como se mencionó con anterioridad, la duración de esta etapa depende de diversos factores, haciendo posible tiempos de análisis que van desde minutos hasta días.



**FIGURA 56.** Ventana de progreso de un análisis en ALGOR®.

**3.3.6.11 Revisión de resultados.** Una vez finalizado el análisis se procede a revisar los resultados entregados en la sección **Superview** de ALGOR®. De una forma gráfica y con escalas de colores se puede ver la distribución de temperaturas en el interior del alimento (mediante planos de corte), representándose el calor cómo va penetrando (para el caso de calentamiento) o saliendo (para el caso de enfriamiento) en cada intervalo de tiempo estipulado, en este caso cada 1 segundo. ALGOR® puede entregar gráficos del historial de temperaturas para cualquier nodo, por ejemplo, para el nodo que represente el "centro térmico" del alimento, que es donde interesa ver si un tratamiento térmico ha sido efectivo. También ALGOR® ofrece la posibilidad de crear una animación de la simulación en formato de video AVI, además puede exportar

resultados en diferentes formatos, por ejemplo, para planillas de cálculo como Microsoft Excel, y puede generar un completo reporte del análisis en formato HTML.

**3.3.7 Ubicación de los puntos evaluados.** En un proceso térmico alimenticio, y desde puntos de vista microbiológicos como enzimáticos, entre otros, es importante conocer aquel punto del alimento donde el tratamiento térmico demora más en ser efectivo, es decir, el punto que más se demora en calentar, para el caso del hidrocalentamiento, y que a su vez es el que más se demora en enfriar, para el caso del hidroenfriamiento. Este punto se conoce como “centro térmico” o “punto de más lento calentamiento/enfriamiento”.

En la presente investigación el centro térmico fue localizado para cada alimento evaluado exportando desde ALGOR® un archivo “CSV” (*Comma Separated Values*, valores separados por coma) con los datos de temperaturas nodales correspondientes a los 300 segundos de proceso simulado (final del calentamiento). Este archivo CSV fue importado directamente en la planilla de cálculo Microsoft Excel, donde se ubicó aquel nodo que poseyera la temperatura más baja. Este nodo correspondería al centro térmico del alimento, y se obtendría así su ubicación espacial (coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

En este mismo archivo y para cada alimento evaluado se ubicó aquel nodo cuyas coordenadas coincidiesen con el punto donde se encontraba el extremo sensible de la termocupla en la etapa experimental. De este nodo se obtendrían sus datos de tiempo y temperatura a lo largo del tratamiento simulado y se compararía con su equivalente experimental.

**3.3.8 Determinación del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales.** La bondad del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales fue expresada mediante el estadístico **RMSE** (*Root Mean*

**Square Error, Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio)** llamado también Error estándar de estimación expresado en forma absoluta (°C) y en forma relativa (%) como sigue (STEEL y TORRIE 1960; BIZOT 1983):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (T_i - T_i^*)^2}{N}}$$

$$RMSE(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_i^N \left[ \frac{(T_i - T_i^*)}{T_i} \right]^2}{N}}$$

donde:

$T_i$  : temperaturas experimentales

$T_i^*$  : temperaturas simuladas

$(T_i - T_i^*)$  : “error de predicción”

$N$  : número total de temperaturas experimentales

En todos los casos los valores de RMSE (°C) y RMSE (%) se determinaron, para la etapa de hidrocalentamiento hasta el momento que comienza a enfriarse el producto (300 s), y para la etapa de hidroenfriamiento hasta el final del proceso (600 s). 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).

## 4 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la verificación de la metodología propuesta para la simulación del proceso de conducción de calor de alimentos de formas irregulares complejas mediante la comparación de los resultados simulados con los experimentales generados en el presente trabajo. Ya que cada alimento evaluado constituye una forma irregular compleja única, la evaluación de los resultados se presenta por separado para cada tipo de alimento.

### 4.1 Turiones de espárragos verdes.

Los resultados obtenidos para los turiones de espárragos verdes se presentan a continuación:

**4.1.1 Modelo digital 3D.** Los modelos 3D obtenidos mediante la digitalización de las réplicas de yeso de los 3 turiones de espárragos seleccionados se pueden observar en la FIGURA 58, FIGURA 61 y FIGURA 64. Puede observarse el grado de detalle logrado en los espárragos capturados. De esta forma los modelos geométricos digitales obtenidos estuvieron listos para ser utilizados en el software de simulación ALGOR©.

**4.1.2 Modelo mallado.** Los modelos digitales con su malla generada en ALGOR© pueden observarse en la FIGURA 59, FIGURA 62 y FIGURA 65. El hecho de que ALGOR© haya podido generar la malla indica que el modelo digital capturado es válido para realizar un análisis de elementos finitos.

**4.1.3 Diagramas de contorno.** En la FIGURA 60, FIGURA 63 y FIGURA 66 se pueden observar cortes longitudinales de las simulaciones resultantes de los turiones de espárragos en ALGOR®. Los resultados se muestran en forma de diagramas de contorno en colores, indicándose el rango que cada color representa en una leyenda (extremo superior derecho). Se puede ir avanzando en cada paso de tiempo (*Time Step*, extremo inferior izquierdo) para ver cómo el calor va penetrando el alimento, mostrándose colores rojizos para las temperaturas más altas, y azulados para las más bajas.

**4.1.4 Estadísticas de los modelos en ALGOR®.** En el CUADRO 13 se presentan las estadísticas resultantes para los modelos digitales en los análisis realizados en ALGOR® para cada turión de espárrago:

**CUADRO 13. Estadísticas de los modelos digitales de espárragos verdes en ALGOR®.**

<i>Item</i>	<i>Espárrago</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>6</i>
<i>Nº de elementos generados</i>	47297	56198	45845
<i>Nº de nodos generados</i>	19942	28309	23308
<i>Espacio ocupado en disco duro (MB)</i>	1850,386	2331,679	1908,312
<i>Tiempo total simulación (min)</i>	304,447 (~5 h)	417,972 (~7 h)	365,286 (~6 h)

Se puede observar en el CUADRO 13 que para los turiones de espárragos rotulados 1 y 6 la cantidad de elementos generados es similar, entre 45 y 47 mil, y el espárrago 2 tiene alrededor de 10 mil elementos más que los otros. Esto último se debe a que el modelo del espárrago 2 presentaba ciertas irregularidades en su superficie en donde ALGOR® generó elementos más pequeños, y por lo tanto más nodos, haciendo que la simulación ocupara

también un mayor espacio en el disco duro y tomara un mayor tiempo en llevarse a cabo (alrededor de 7 horas).

**4.1.5 Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados.** En las pruebas experimentales las termocuplas fueron insertadas en los turiones de espárragos en dirección axial desde su base hasta 2,5 cm de profundidad. Es así que en su correspondiente modelo digital en ALGOR® se debió localizar aquel nodo cuya ubicación espacial fuese similar ( $2,5 \pm 0,1$  cm medido en la dirección del eje Z desde la base) a aquella experimental. Aquellos nodos evaluados y su ubicación espacial para cada modelo digital de los turiones de espárrago se detallan en el CUADRO 14. Fue de este nodo que se obtuvo su perfil de temperatura simulado y se comparó con su correspondiente perfil experimental para cada turión de espárrago.

**CUADRO 14. Características del nodo evaluado para los turiones de espárragos digitales.**

<i>Item</i>	<i>Espárrago</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>6</i>
<i>Nº nodo evaluado</i>	15999	22328	20460
<i>Ubicación espacial del nodo evaluado (eje Z) (m)</i>	0,0250682	0,0250469	0,0250039

A su vez, en el CUADRO 15 se muestran las características del nodo correspondiente al centro térmico o punto de más lento calentamiento/enfriamiento para cada turión de espárrago.

**CUADRO 15. Características del nodo correspondiente al centro térmico en los turiones de espárragos digitales.**

<i>Item</i>	<i>Espárrago</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>6</i>
<i>Nº nodo</i>	16202	24543	21011
<i>Ubicación espacial del nodo (eje Z) (m)</i>	0,0420889	0,0207183	0,012234

En el CUADRO 15 se puede observar que la ubicación (nodo) del centro térmico en cada espárrago difiere de la del nodo evaluado (CUADRO 14). Esta diferencia es mayor en los espárragos rotulados 1 y 6, siendo mayor a 1 cm en ambos casos. En el espárrago 2, sin embargo, el nodo medido se acercó mayormente al centro térmico, siendo esta diferencia de aproximadamente 4 mm.

También se puede observar en el CUADRO 15 que hay gran variabilidad en la ubicación del centro térmico (punto de más lento calentamiento/enfriamiento) entre espárragos, encontrando diferencias de, por ejemplo, 3 cm entre los espárragos 1 y 6. Esta variabilidad demuestra la influencia de la asimetría geométrica de los dominios 3D de los turiones de espárragos, aún presentando calibres comerciales similares, sobre la cinética de transferencia de calor.

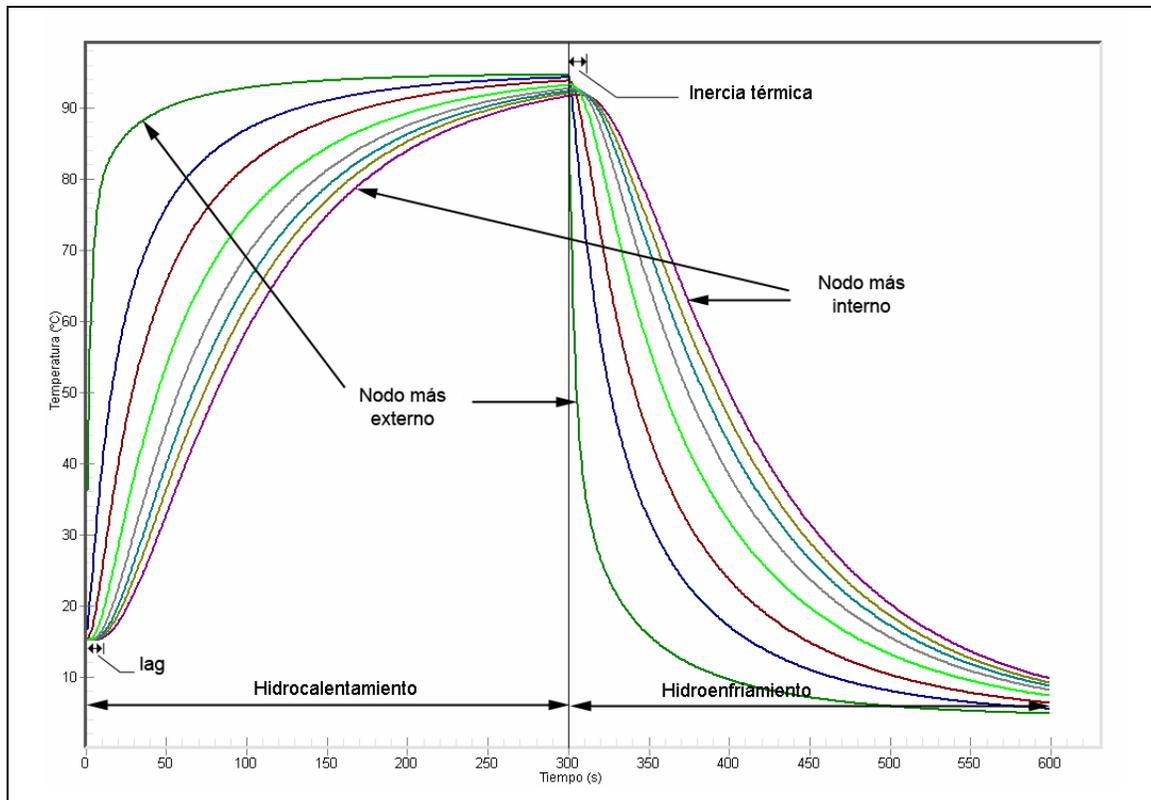
En la FIGURA 67, FIGURA 68 y FIGURA 69 se muestran las gráficas comparativas de los perfiles de temperatura experimentales y simulados de los tratamientos de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en los turiones de espárragos verdes. Se puede observar en dichas gráficas que el software ALGOR® describe adecuadamente la cinética tanto de calentamiento como de enfriamiento, describiendo particularidades como el retardo inicial o “lag” y la

“inercia térmica”, características de los puntos o nodos interiores de los alimentos.

Los fenómenos mencionados se ilustran en forma más clara en la FIGURA 57 donde se grafican los perfiles de temperatura simulados para el nodo de más lento calentamiento y para algunos nodos vecinos en dirección radial hasta la superficie. Cabe mencionar que la inercia térmica es un fenómeno en el cual se observa que al pasar desde una etapa de calentamiento a otra de enfriamiento, los nodos interiores continúan aumentando su temperatura por un lapso de tiempo determinado, debido a que los nodos adyacentes también lo hacen, excepto los nodos cercanos a la superficie los que comienzan inmediatamente a disminuir la temperatura al entrar al medio de enfriamiento. La inercia térmica depende de factores tales como:

- Temperatura y humedad del producto, los cuales influyen directamente y en forma significativa sobre la conductividad térmica y las restantes propiedades del alimento. A menor magnitud de la conductividad térmica mayor resistencia a la transferencia de calor, por lo tanto habría mayor inercia térmica.
- Dimensión del producto, es otro factor importante a considerar, ya que a mayor diámetro o espesor se puede observar una mayor "inercia térmica" en los perfiles de temperatura, debido esencialmente a un mayor retardo en la velocidad de cambio de temperatura de los nodos o puntos interiores.
- Tiempo de exposición del objeto en el medio de calentamiento. En tiempos cortos de proceso, la pendiente de la curva de calentamiento es más pronunciada, lo que provocará que al pasar al medio de enfriamiento los nodos interiores más fríos sigan calentándose, generando un mayor lapso de inercia térmica. No así en tiempos largos de exposición, donde la pendiente tiende a cero (las temperaturas de todos los nodos confluyen a la del medio), haciendo

que al pasar al enfriamiento los nodos interiores respondan casi de inmediato al cambio de temperatura.



**FIGURA 57. Perfiles de temperatura simulados en ALGOR© durante el proceso combinado escaldado-hidrogenfriado de espárragos verdes.**

**4.1.6 Valores de RMSE.** La bondad del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales fue expresada mediante el RMSE expresado tanto en términos absolutos (°C) como relativos (%), valores que se pueden ver en el CUADRO 16.

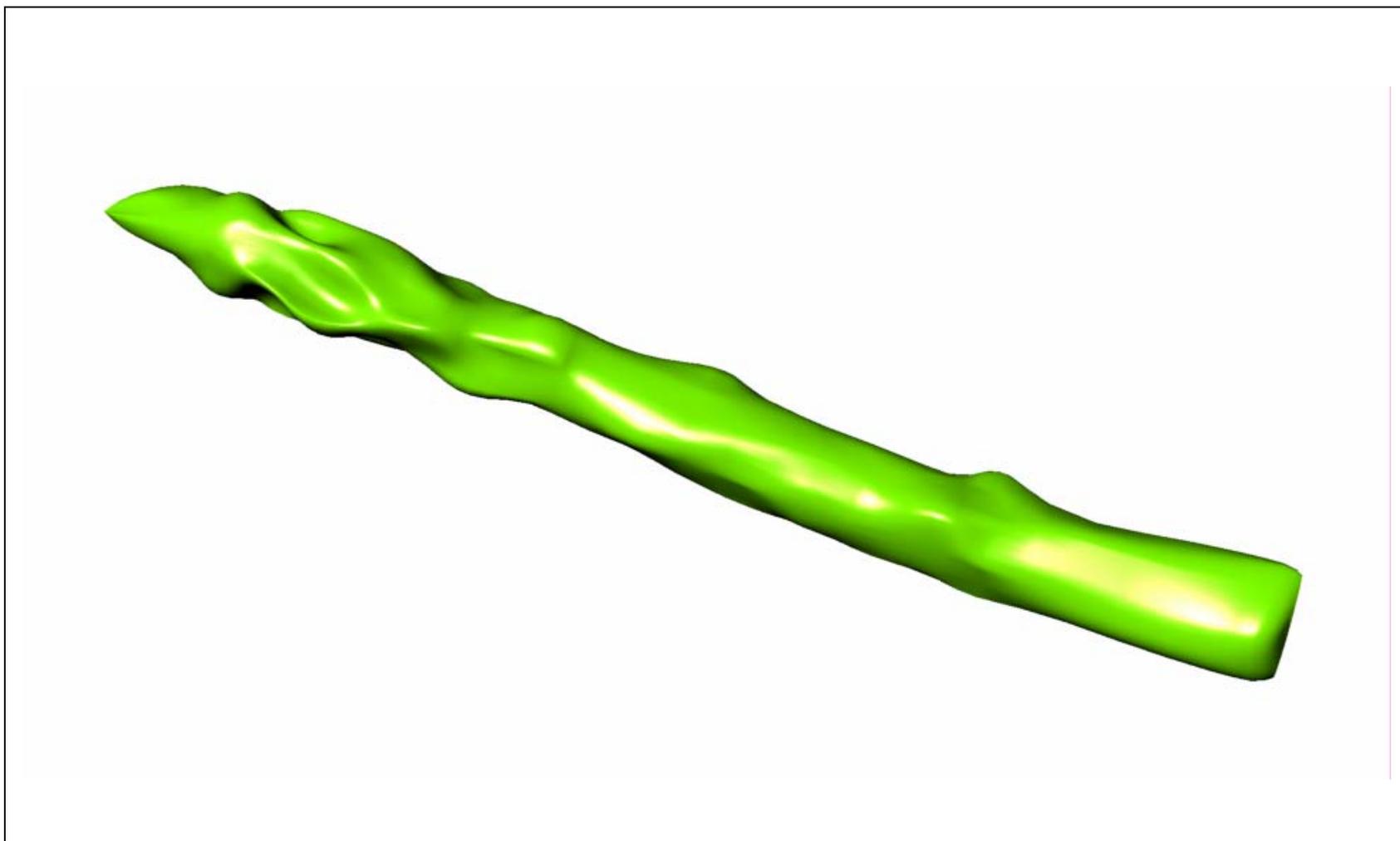
De los resultados mostrados en el CUADRO 16, se puede inferir que no existen diferencias entre los perfiles de temperatura experimentales y simulados de los espárragos, ya que los valores de RMSE(%) indican un buen ajuste al encontrarse muy por debajo del criterio ingenieril adoptado de 10%. Para la

etapa de hidrocalentamiento se encontraron valores de RMSE(%) no superiores al 2,2% (correspondiente a un RMSE de 0,74 °C), mientras que en la etapa de hidrogenfriamiento estos valores no sobrepasaron el 3,85% (RMSE de 1,06 °C). Además, para el proceso global también los valores de RMSE(%) se encontraron bajo el 10%, siendo no superiores al 2,99% (RMSE de 0,86 °C).

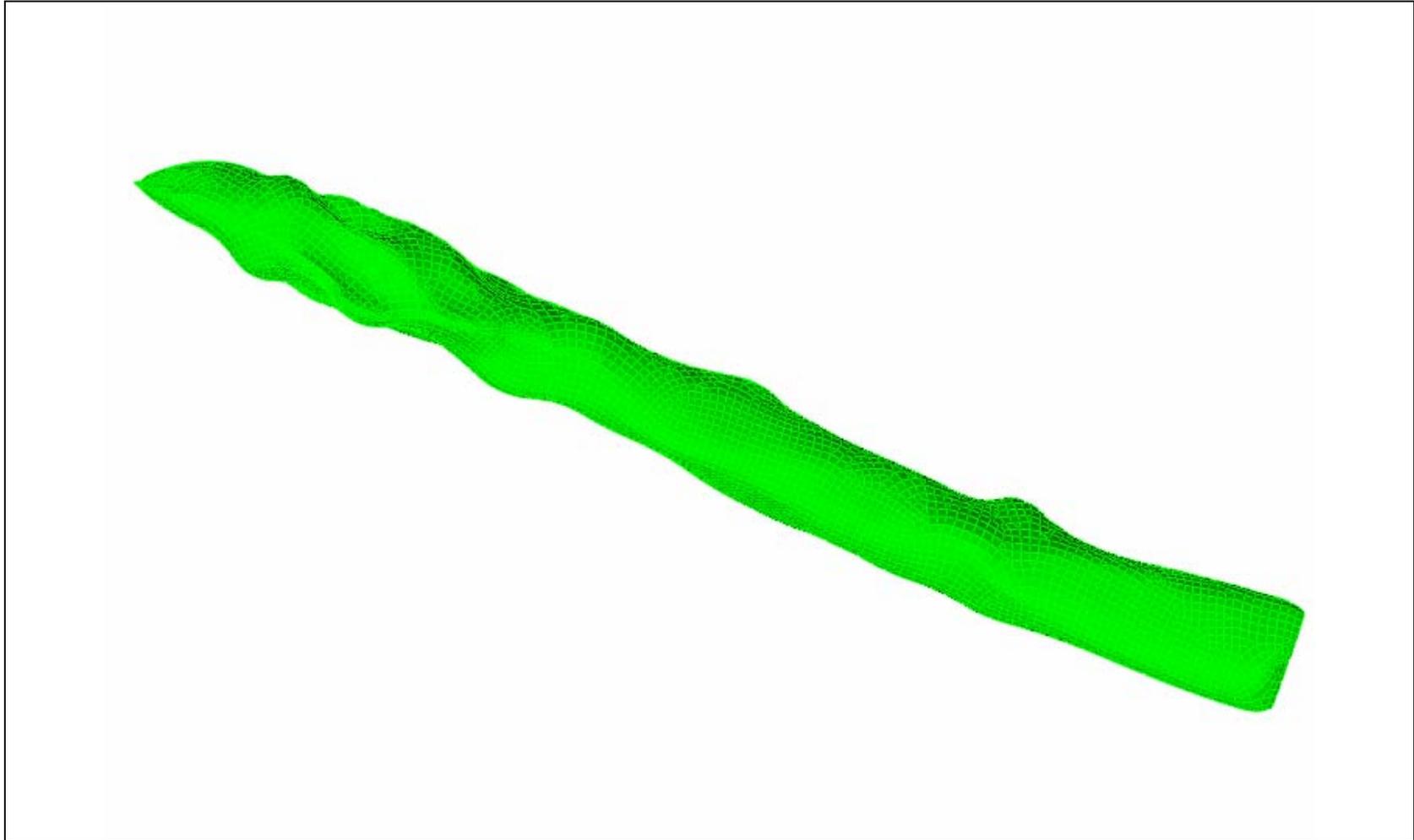
**CUADRO 16. Valores de RMSE para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en turiones de espárragos verdes.**

<i>Espárrago</i>	<i>Hidrocalentamiento</i>		<i>Hidrogenfriamiento</i>		<i>Proceso global</i>	
	<i>RMSE (°C)</i>	<i>RMSE (%)</i>	<i>RMSE (°C)</i>	<i>RMSE (%)</i>	<i>RMSE (°C)</i>	<i>RMSE (%)</i>
1	0,56	0,92	0,62	3,09	0,59	2,27
2	0,61	1,78	1,06	3,85	0,86	2,99
6	0,74	2,21	1,06	3,44	0,91	2,88

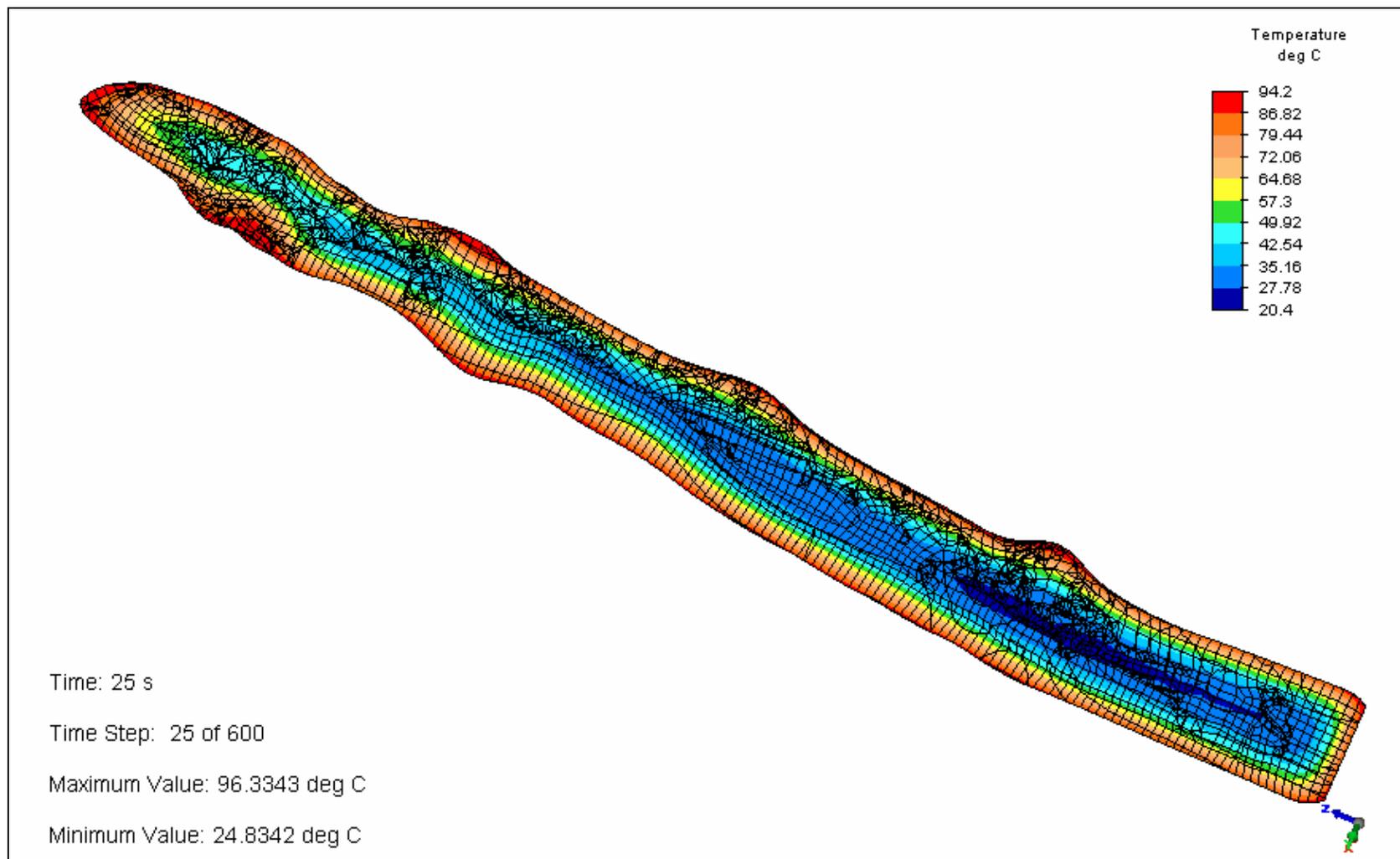
Lo descrito anteriormente demuestra la adecuada descripción del proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en turiones de espárragos verdes mediante simulación computacional por el Método de Elementos Finitos con el software ALGOR®.



**FIGURA 58. Modelo digital 3D del espárrago “1” en Rhinoceros©.**



**FIGURA 59. Modelo mallado del espárrago “1” en ALGOR©.**



**FIGURA 60. Corte longitudinal del diagrama de contorno del espárrago “1” en ALGOR©.**

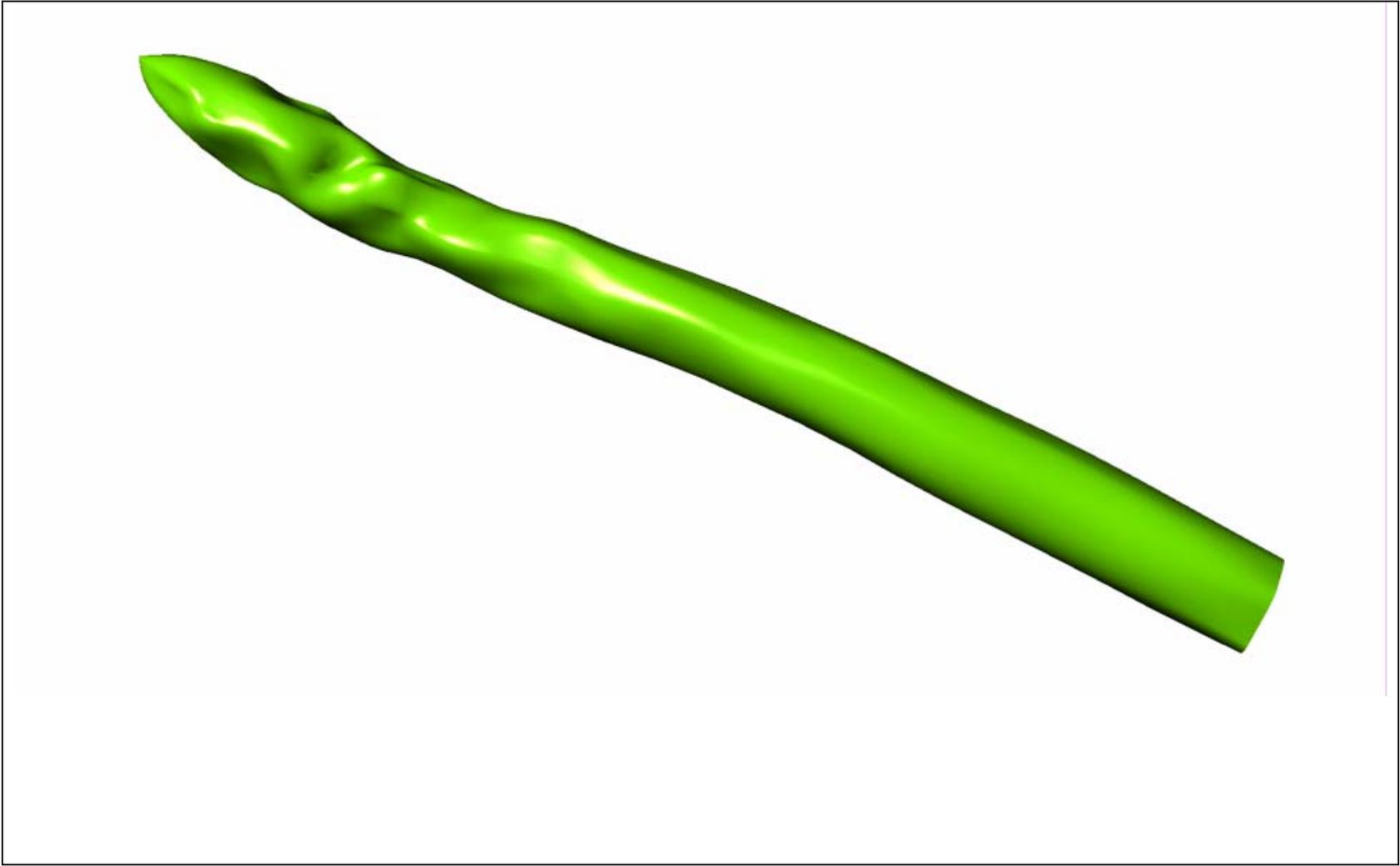
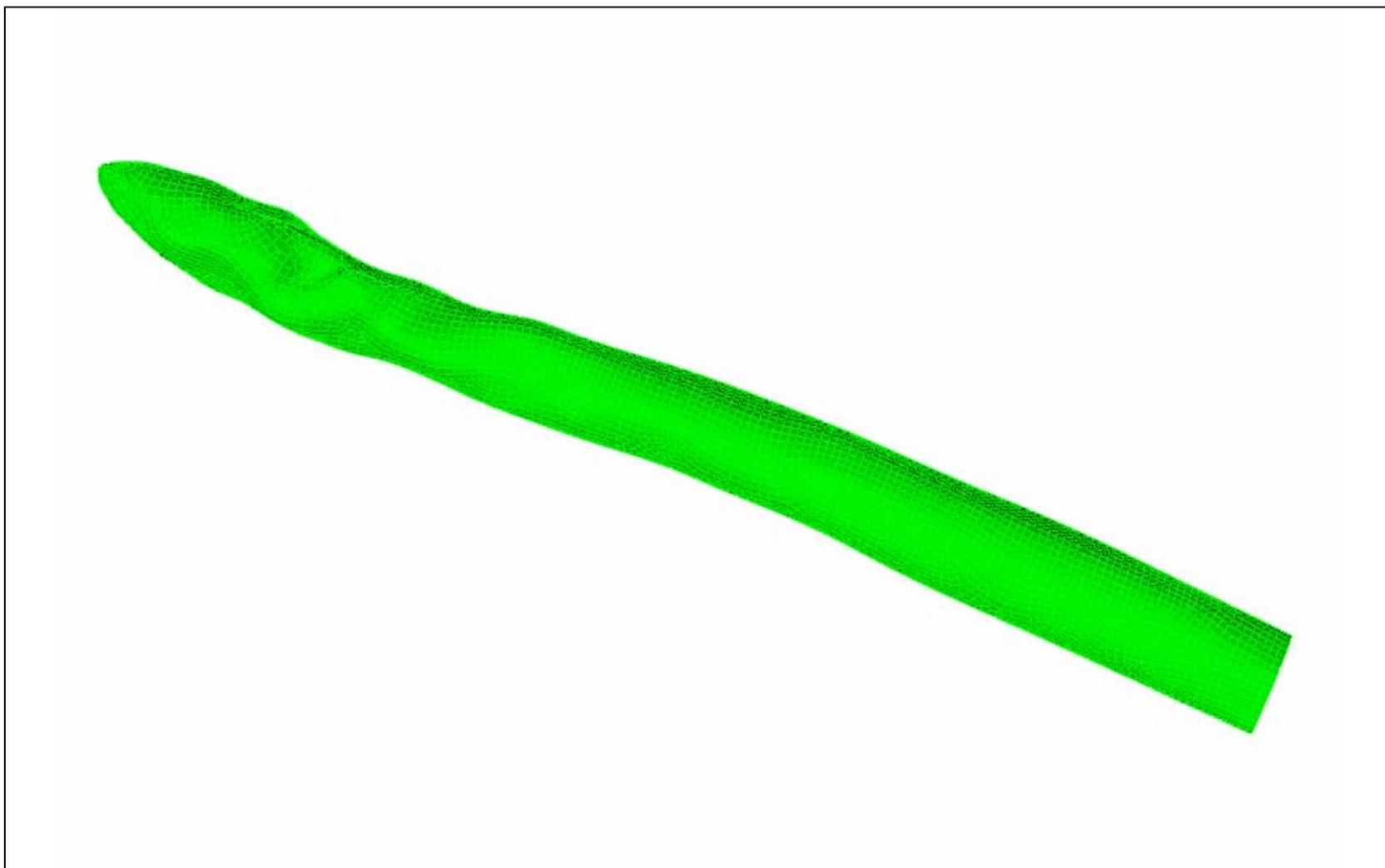
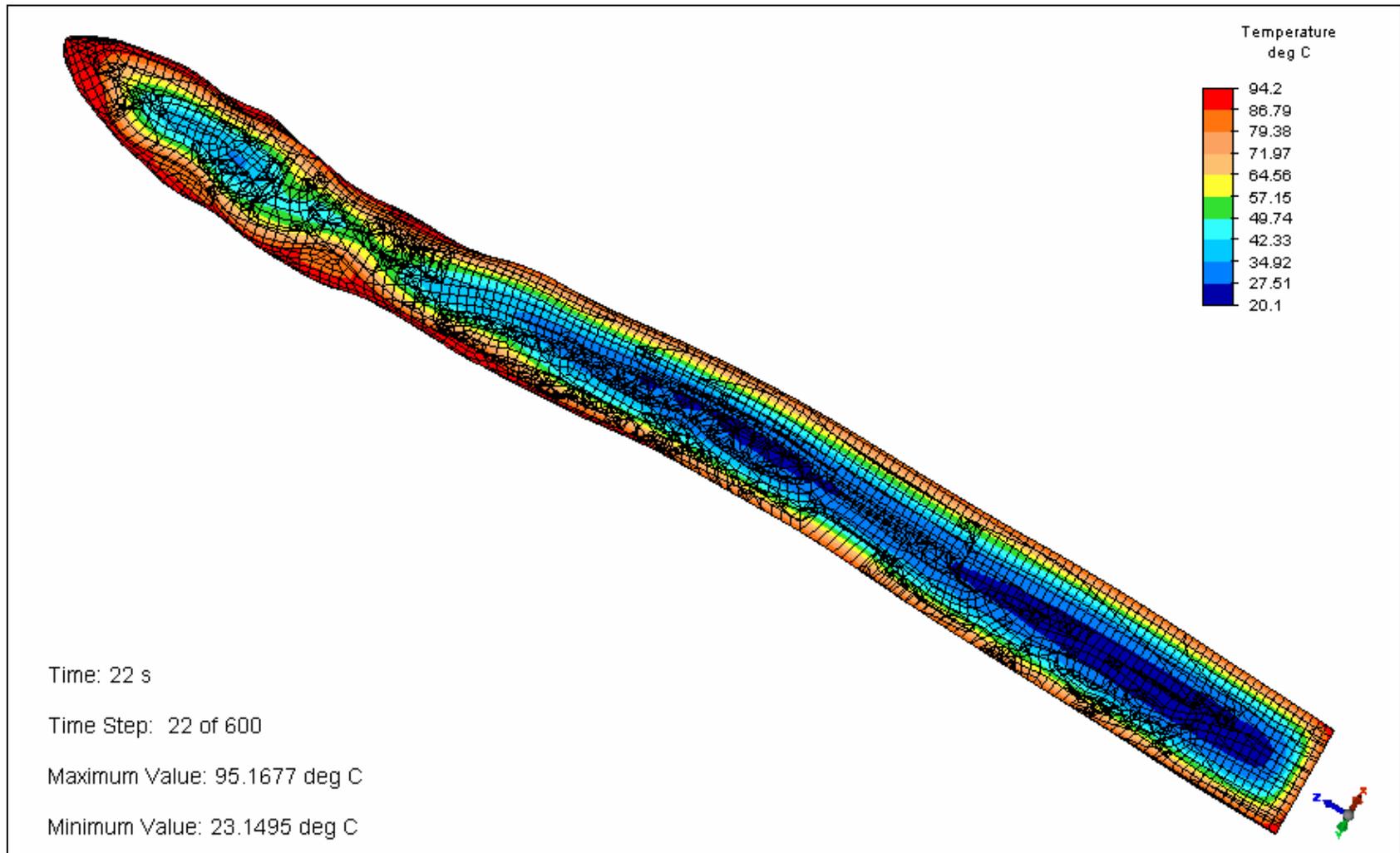


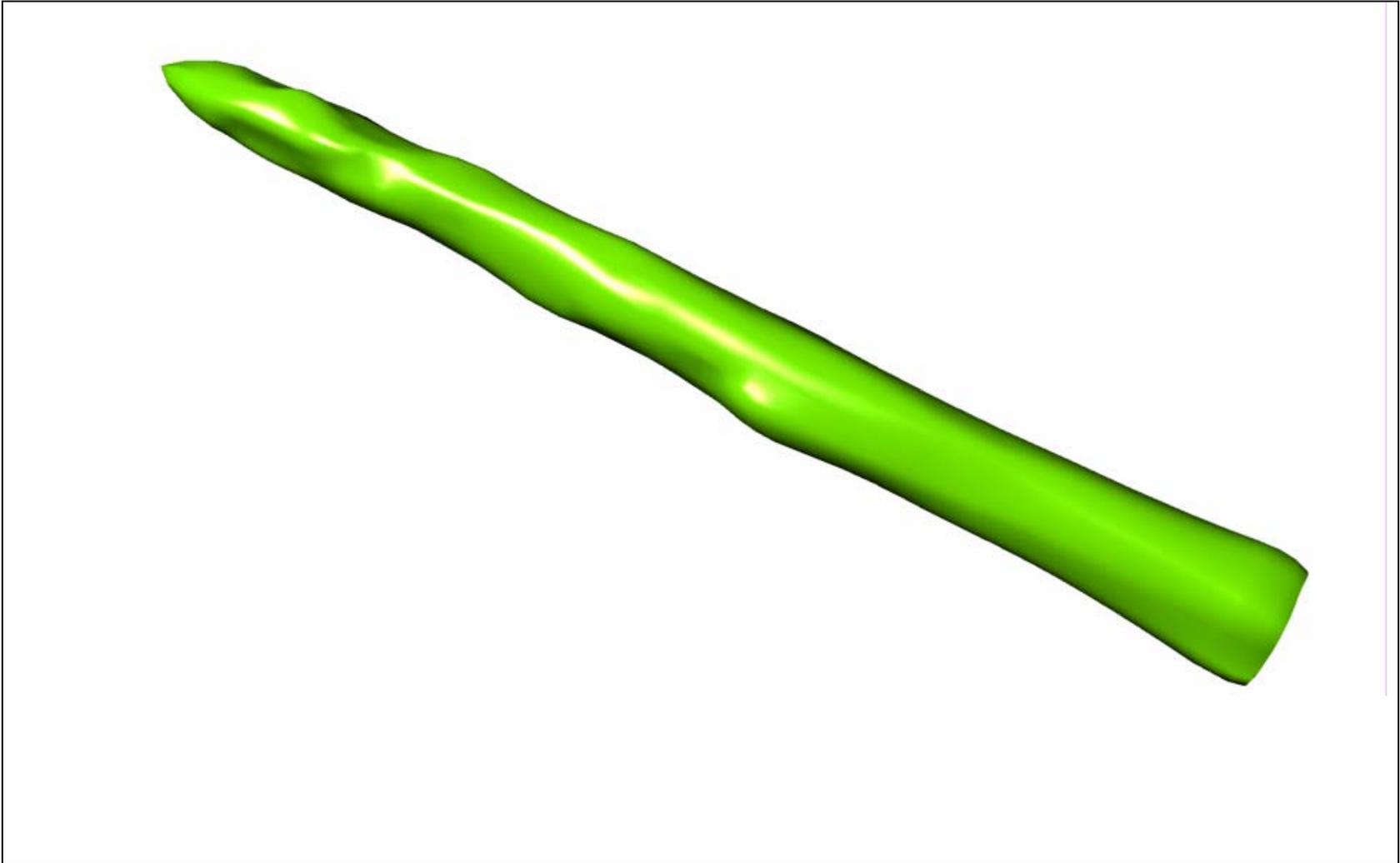
FIGURA 61. Modelo digital 3D del espárrago “2” en Rhinoceros©.



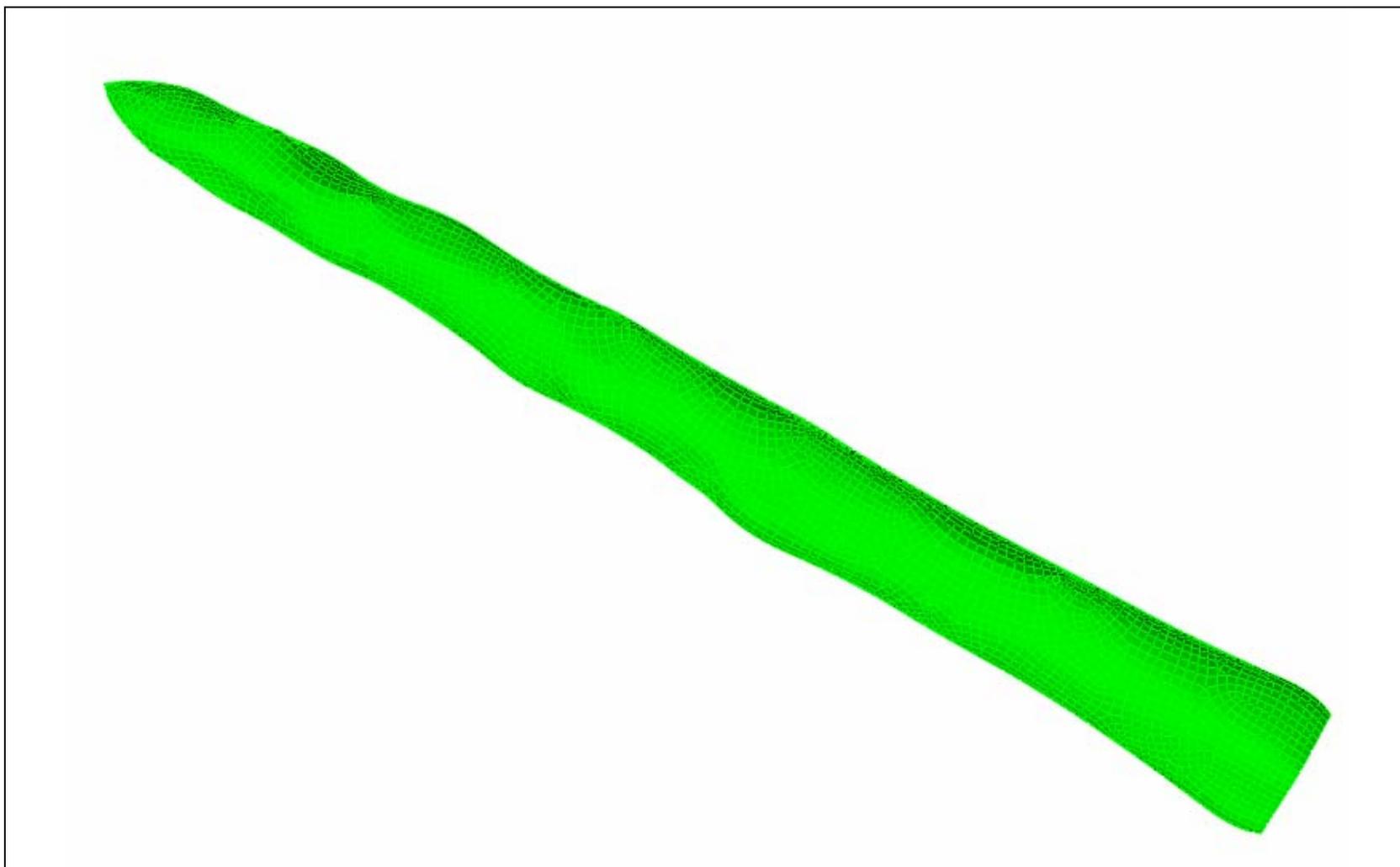
**FIGURA 62. Modelo mallado del espárrago “2” en ALGOR©.**



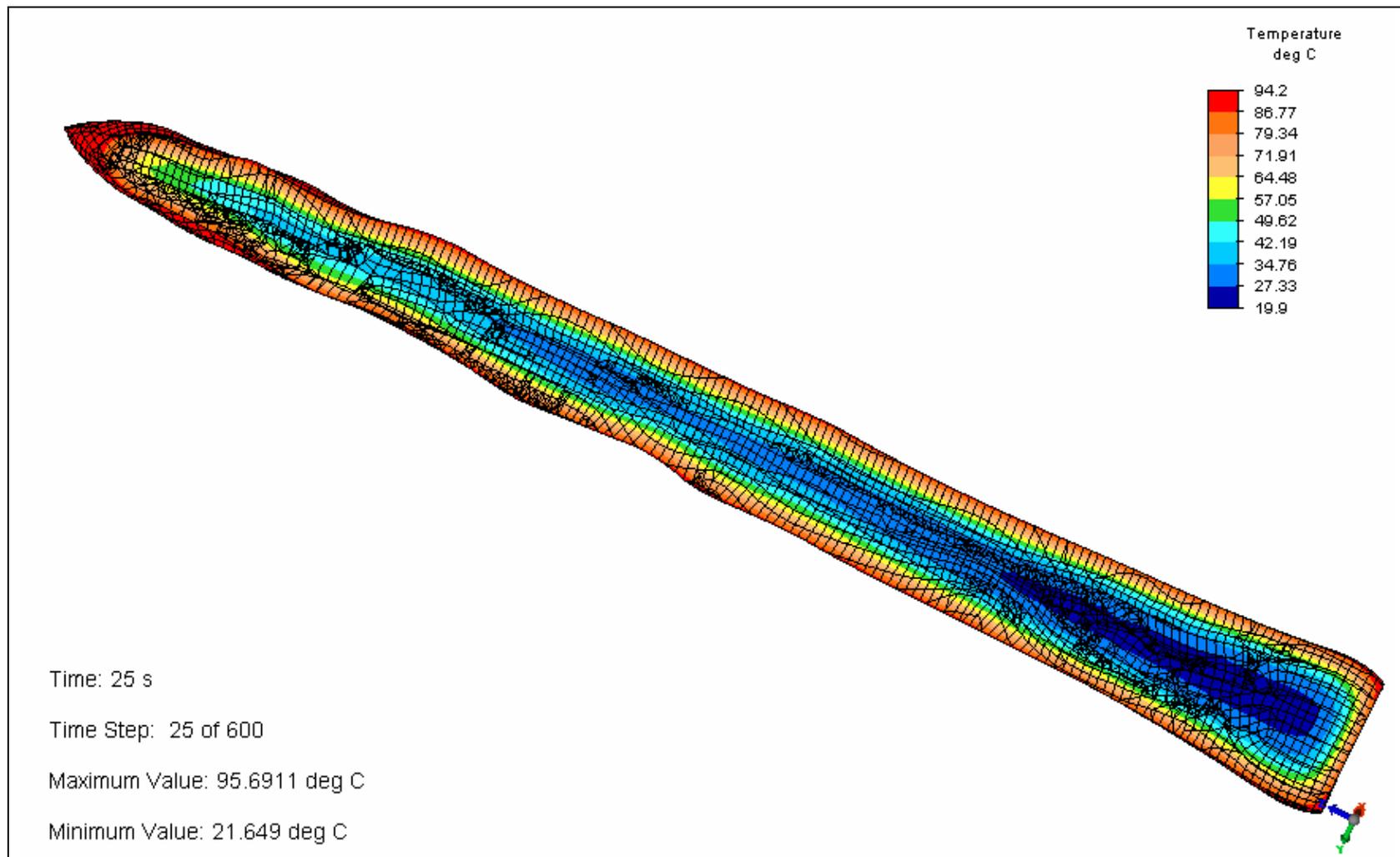
**FIGURA 63. Corte longitudinal del diagrama de contorno del espárrago “2” en ALGOR©.**



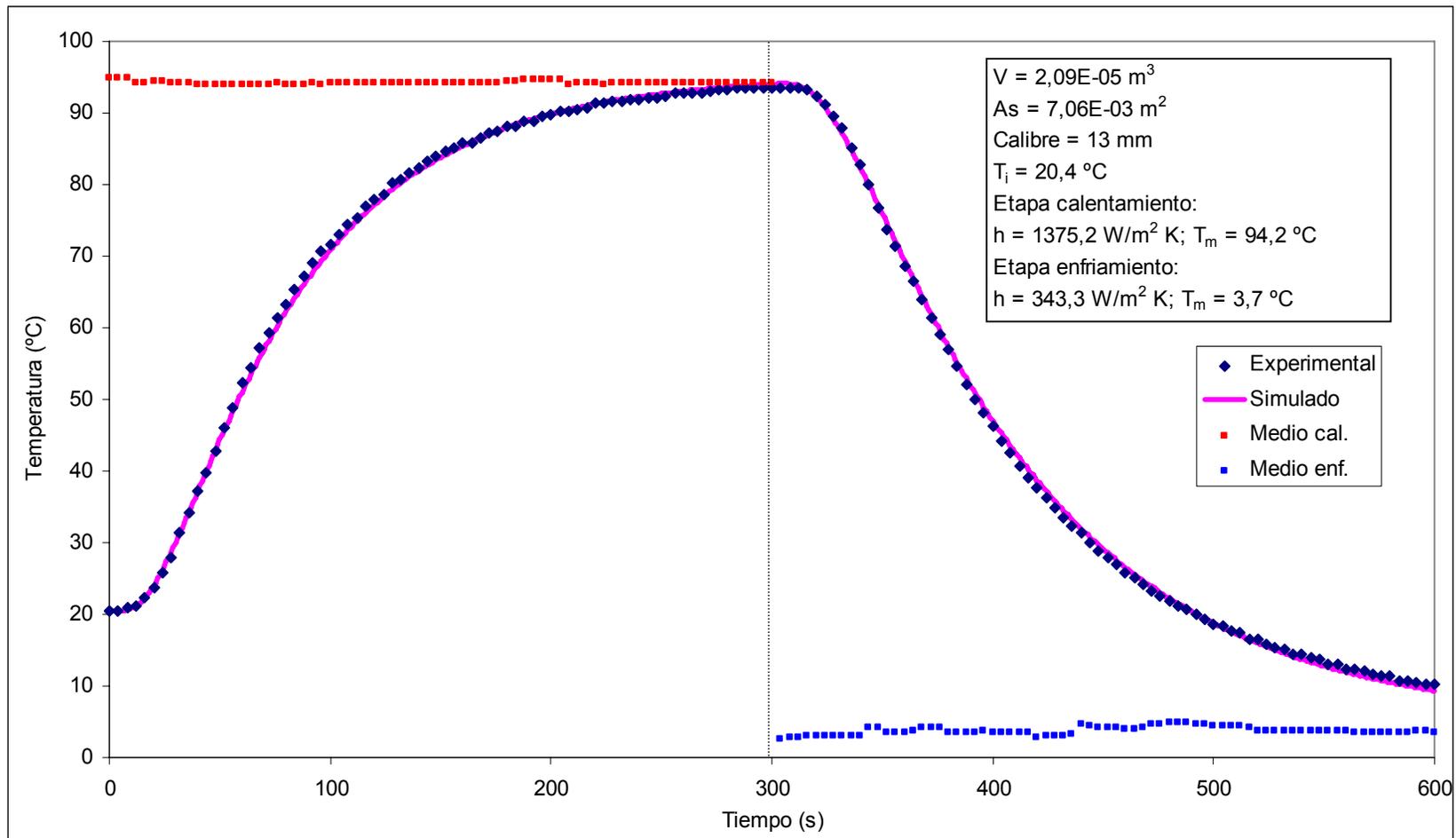
**FIGURA 64.** Modelo digital 3D del espárrago “6” en Rhinoceros©.



**FIGURA 65. Modelo mallado del espárrago “6” en ALGOR©.**



**FIGURA 66. Corte longitudinal del diagrama de contorno del espárrago “6” en ALGOR©.**



**FIGURA 67. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento del espárrago “1”.**

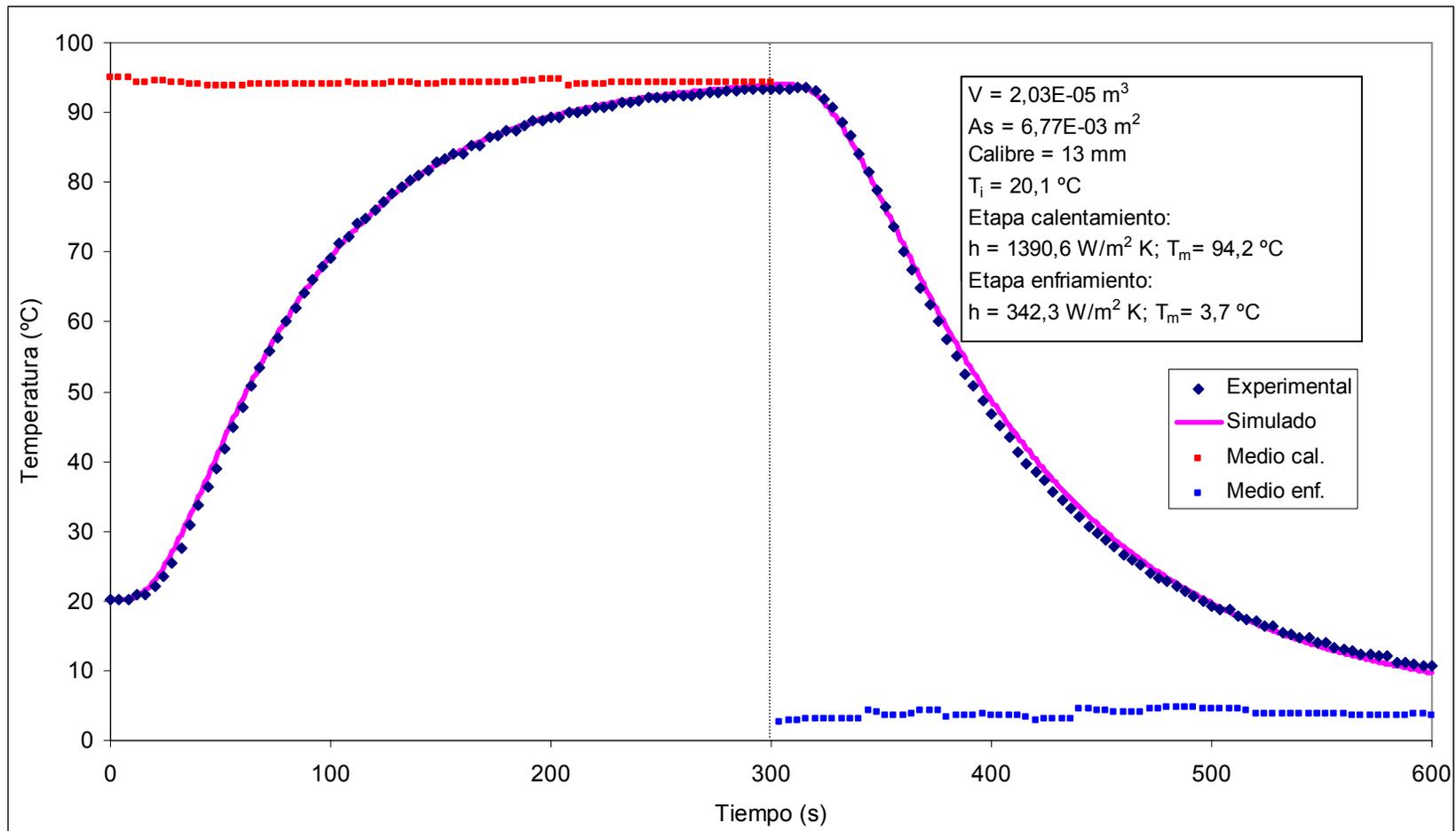
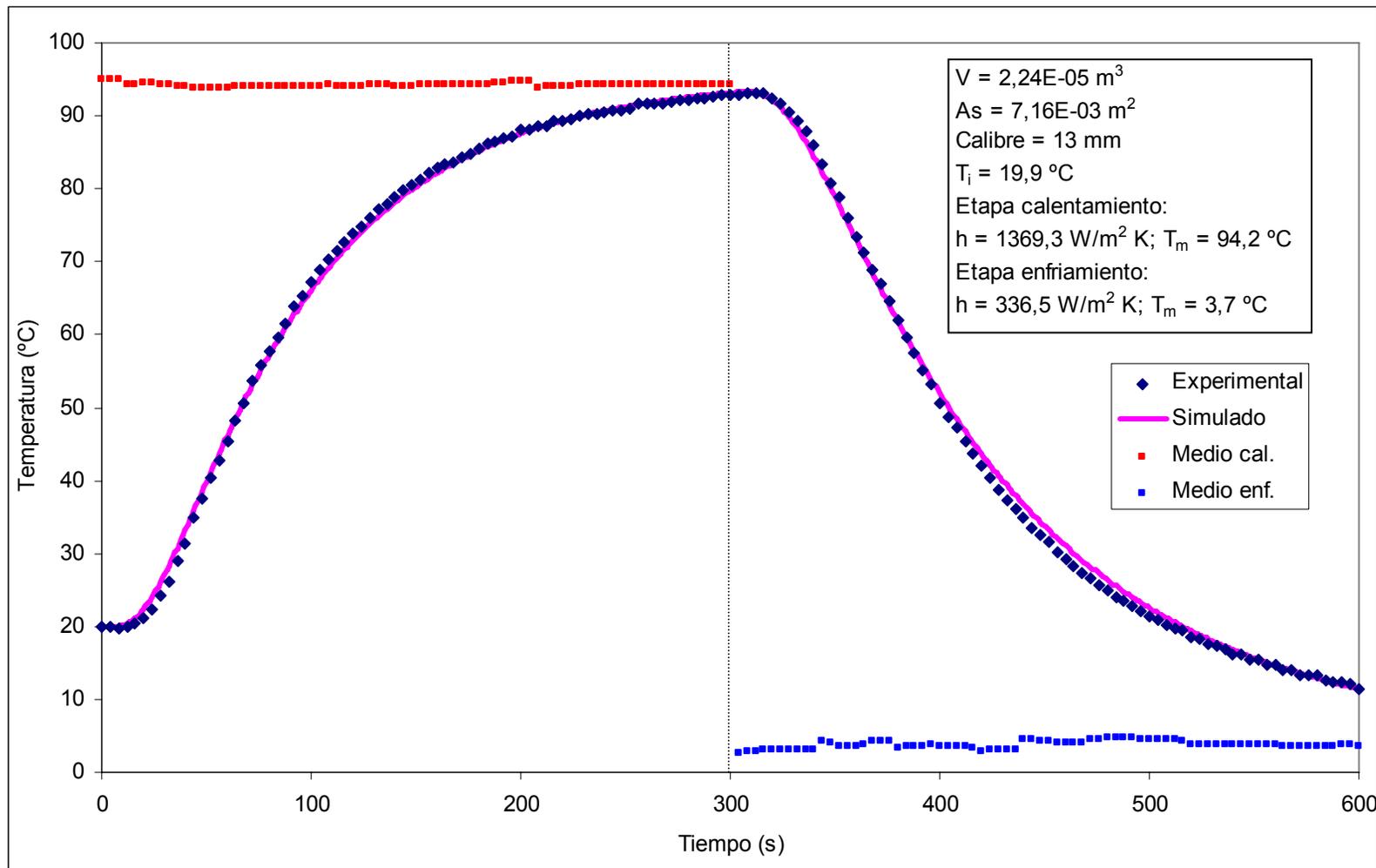


FIGURA 68. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento del espárrago “2”.



**FIGURA 69. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento del espárrago “6”.**

## 4.2 Floretes de Brócoli.

Los resultados obtenidos para los floretes de brócoli se presentan a continuación:

**4.2.1 Modelo digital 3D.** Los modelos 3D obtenidos mediante la digitalización de las réplicas de yeso, y posterior modelación de los detalles, de los 3 floretes de brócoli considerados se pueden observar en la FIGURA 70, FIGURA 73 y FIGURA 76. Puede observarse en color verde claro el tallo digitalizado, mientras que en verde oscuro se muestran los pedúnculos y las yemas florales que tuvieron que ser modeladas en Rhinoceros©. De esta forma los modelos digitales obtenidos estuvieron listos para ser utilizados en el software de simulación ALGOR©.

**4.2.2 Modelo mallado.** Los modelos con su malla generada en ALGOR© pueden observarse en la FIGURA 71, FIGURA 74 y FIGURA 77. Se puede observar que las yemas florales y el tallo presentan diferentes colores. Esto es debido a que ALGOR© reconoce que son partes que componen el mismo modelo pero que no están unidas, sino en contacto, por lo tanto le asigna colores distintos para su fácil diferenciación. El hecho de que ALGOR© haya podido generar la malla indica que el modelo digital capturado es válido para realizar un análisis de elementos finitos.

**4.2.3 Diagramas de contorno.** En la FIGURA 72, FIGURA 75 y FIGURA 78 se pueden observar cortes longitudinales de las simulaciones resultantes de los floretes de brócoli en ALGOR©. Los resultados se muestran en forma de diagramas de contorno en colores, indicándose el rango que cada color representa en una leyenda (extremo superior derecho). Se puede ir avanzando en cada paso de tiempo (*Time Step*, extremo inferior izquierdo) para ver cómo el calor va penetrando el alimento, mostrándose colores rojizos para las temperaturas más altas, y azulados para las más bajas.

**4.2.4 Estadísticas de los modelos en ALGOR®.** En el CUADRO 17 se presentan las estadísticas resultantes para los modelos en los análisis realizados en ALGOR® para cada florete de brócoli.

**CUADRO 17. Estadísticas de los modelos digitales de los floretes de brócoli en ALGOR®.**

<i>Item</i>	<i>Brócoli</i>		
	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Nº de elementos generados</i>	322263	330794	150225
<i>Nº de nodos generados</i>	103963	109821	49736
<i>Espacio ocupado en disco duro (MB)</i>	10454,593	17928,671	4920,532
<i>Tiempo total simulación (min)</i>	4934,914 (~3,4 d)	3753,587 (~2,6 d)	1477,837 (~1 d)

En el CUADRO 17 destaca el considerable aumento de tiempo de simulación que los modelos digitales de brócolis requirieron en comparación a los espárragos, siendo del orden de días, llegando a tomar, por ejemplo, más de 3 días para el análisis del brócoli 2. Esto se debe a la mayor complejidad observada en la superficie de estos modelos, lo que llevó a ALGOR® a generar más puntos de refinamiento en aquellas zonas de alta complejidad, y por lo tanto mayor cantidad de elementos. También se puede ver que para los floretes rotulados 2 y 3 la cantidad de elementos generados es similar y aproximadamente el doble que el florete 4. Esto se debe a que en el modelo digital del brócoli 2 y 3 se tuvieron que generar muchos puntos de refinamiento en la malla para que ALGOR® aceptara el modelo como válido para la simulación, lo que hizo que se generaran en esos sectores elementos más pequeños aumentando considerablemente el número total de elementos, el número de nodos, el espacio ocupado y el tiempo de análisis.

**4.2.5 Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados.** Al igual que para los espárragos, en los modelos digitales de los floretes se debió localizar aquel nodo cuya ubicación espacial fuese similar a la ubicación del punto de medición experimental de la termocupla ( $0,8 \pm 0,1$  cm medidos en el eje Z desde la base). Aquellos nodos evaluados y su ubicación para cada brócoli se detallan en el CUADRO 18. Fue de este nodo que se obtuvo su perfil de temperatura simulado y se comparó con su correspondiente experimental para cada florete de brócoli.

**CUADRO 18. Características del nodo evaluado para los floretes de brócoli digitales**

<i>Item</i>	<i>Brócoli</i>		
	2	3	4
<i>Nº nodo evaluado</i>	103896	50179	27796
<i>Ubicación espacial del nodo evaluado (eje Z) (m)</i>	0.00805824	0.00891493	0.00897898

A su vez, en el CUADRO 19 se muestran las características del nodo correspondiente al centro térmico o punto de más lento calentamiento/enfriamiento para cada florete de brócoli.

**CUADRO 19. Características del nodo correspondiente al centro térmico de los floretes de brócoli digitales.**

<i>Item</i>	<i>Brócoli</i>		
	2	3	4
<i>Nº nodo</i>	102634	47183	30385
<i>Ubicación espacial del nodo (eje Z) (m)</i>	0,0126238	0,0197487	0,0133994

En el CUADRO 19 se puede observar que la ubicación (nodo) del centro térmico en cada florete de brócoli difiere de la del nodo evaluado (CUADRO 18), encontrándose diferencias de aproximadamente 4 mm (brócoli 1 y 4) y 1 cm (brócoli 3). También se puede observar en el CUADRO 19 que hay variabilidad en la ubicación del centro térmico entre los floretes de brócoli, encontrando diferencias de, por ejemplo, 7 mm entre los brócolis 2 y 3. Esta variabilidad demuestra la influencia de la asimetría geométrica de los dominios irregulares 3D de los floretes de brócoli, aún presentando calibres similares del tallo, sobre la cinética de transferencia de calor.

En la FIGURA 79, FIGURA 80 y FIGURA 81 se muestran las gráficas comparativas de los perfiles de temperatura experimentales y simulados de los tratamientos de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en los floretes de brócoli. Al igual que en los espárragos, se puede observar en estas gráficas que el software ALGOR® describe las características de retardo inicial o “lag” y la “inercia térmica”.

**4.2.6 Valores de RMSE.** La bondad del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales fue expresada mediante el RMSE expresado tanto en términos absolutos (°C) como relativos (%), valores que se pueden ver en el CUADRO 20.

**CUADRO 20. Valores de RMSE para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en floretes de brócoli.**

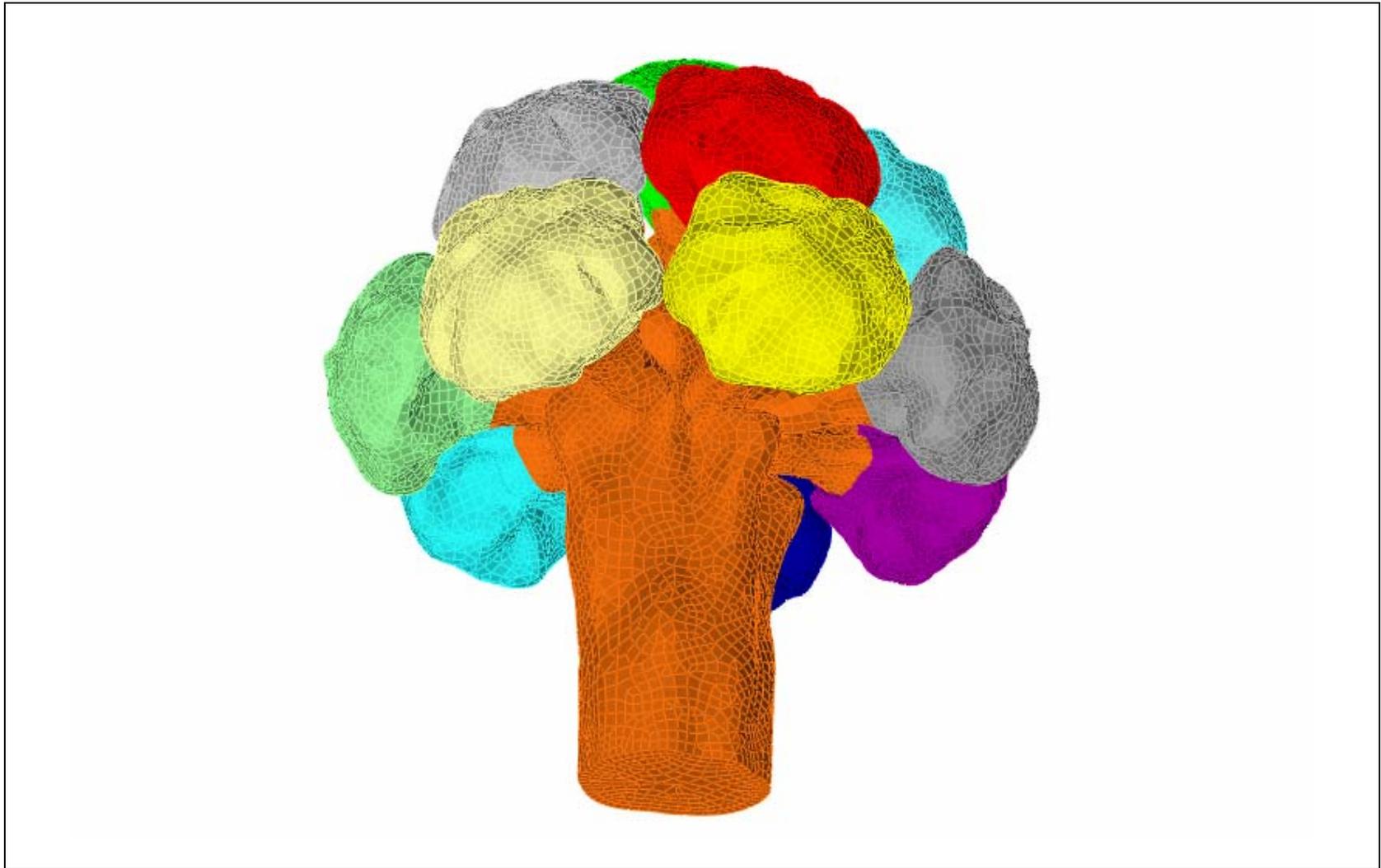
<i>Brócoli</i>	<i>Hidrocalentamiento</i>		<i>Hidrogenfriamiento</i>		<i>Proceso global</i>	
	<i>RMSE (°C)</i>	<i>RMSE (%)</i>	<i>RMSE (°C)</i>	<i>RMSE (%)</i>	<i>RMSE (°C)</i>	<i>RMSE (%)</i>
2	0,49	1,17	0,95	9,56	0,75	6,79
3	0,58	0,92	1,00	9,99	0,82	7,07
4	0,45	0,98	0,95	9,51	0,74	6,74

De los resultados mostrados en el CUADRO 20, se puede inferir que no existen diferencias entre los perfiles de temperatura experimentales y simulados de los floretes de brócoli, ya que los valores de RMSE(%) indican un buen ajuste al encontrarse por debajo del criterio ingenieril adoptado de 10%. En la etapa de hidrocalentamiento estos valores fueron muy bajos, siendo menores al 1,17% (correspondiente a un RMSE de 0,49 °C). En la etapa de hidrogenfriamiento, en cambio, se encontraron valores superiores al 9,5% (RMSE de 0,95 °C), encontrándose muy cercanos al porcentaje adoptado como el nivel de aceptabilidad del 10%. Para el proceso global también los valores de RMSE(%) se encontraron bajo el 10%, siendo no superiores al 7,07% (RMSE de 0,82 °C).

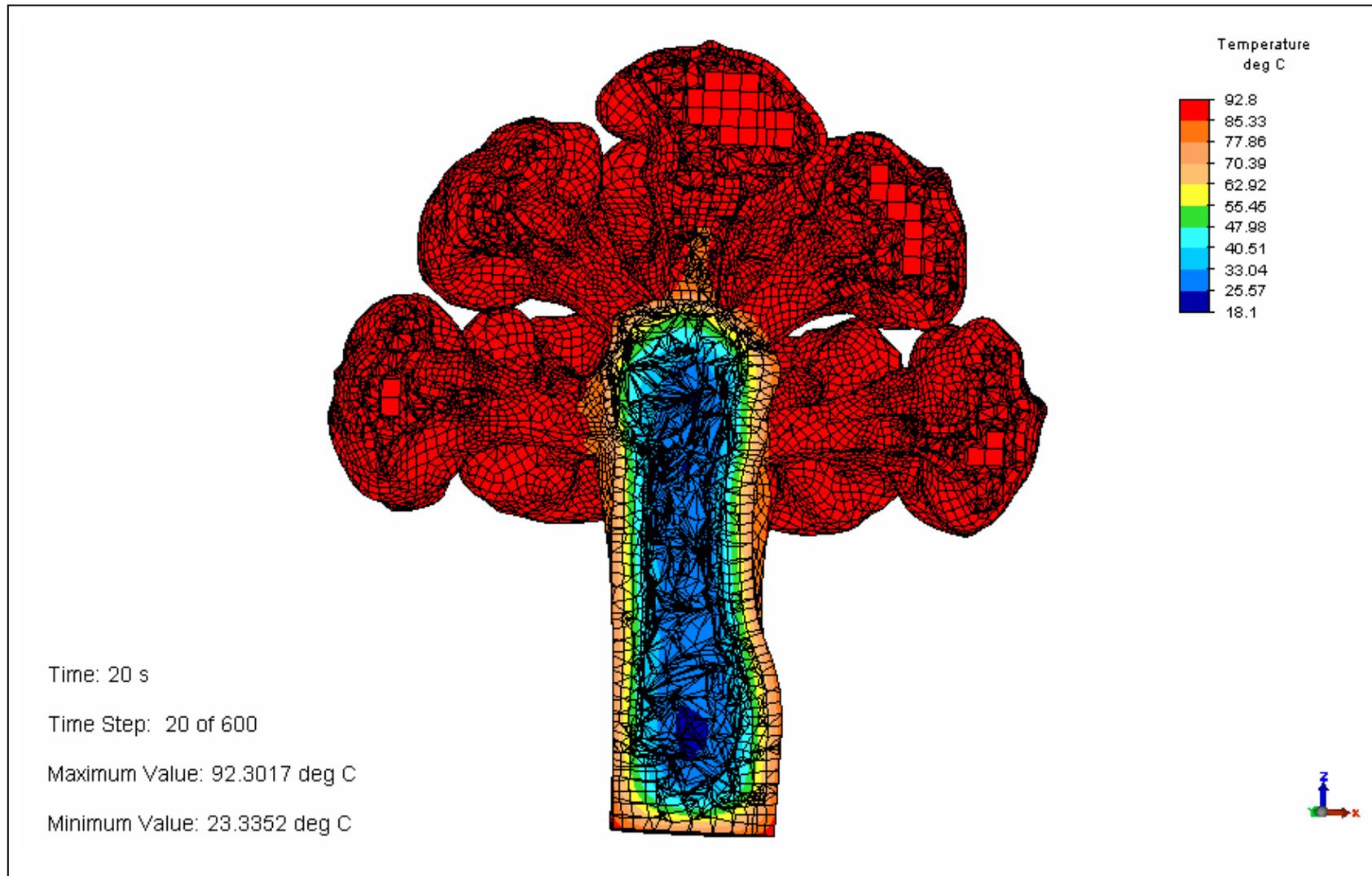
Lo descrito anteriormente demuestra la adecuada descripción del proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en floretes de brócoli mediante simulación con el software ALGOR®.



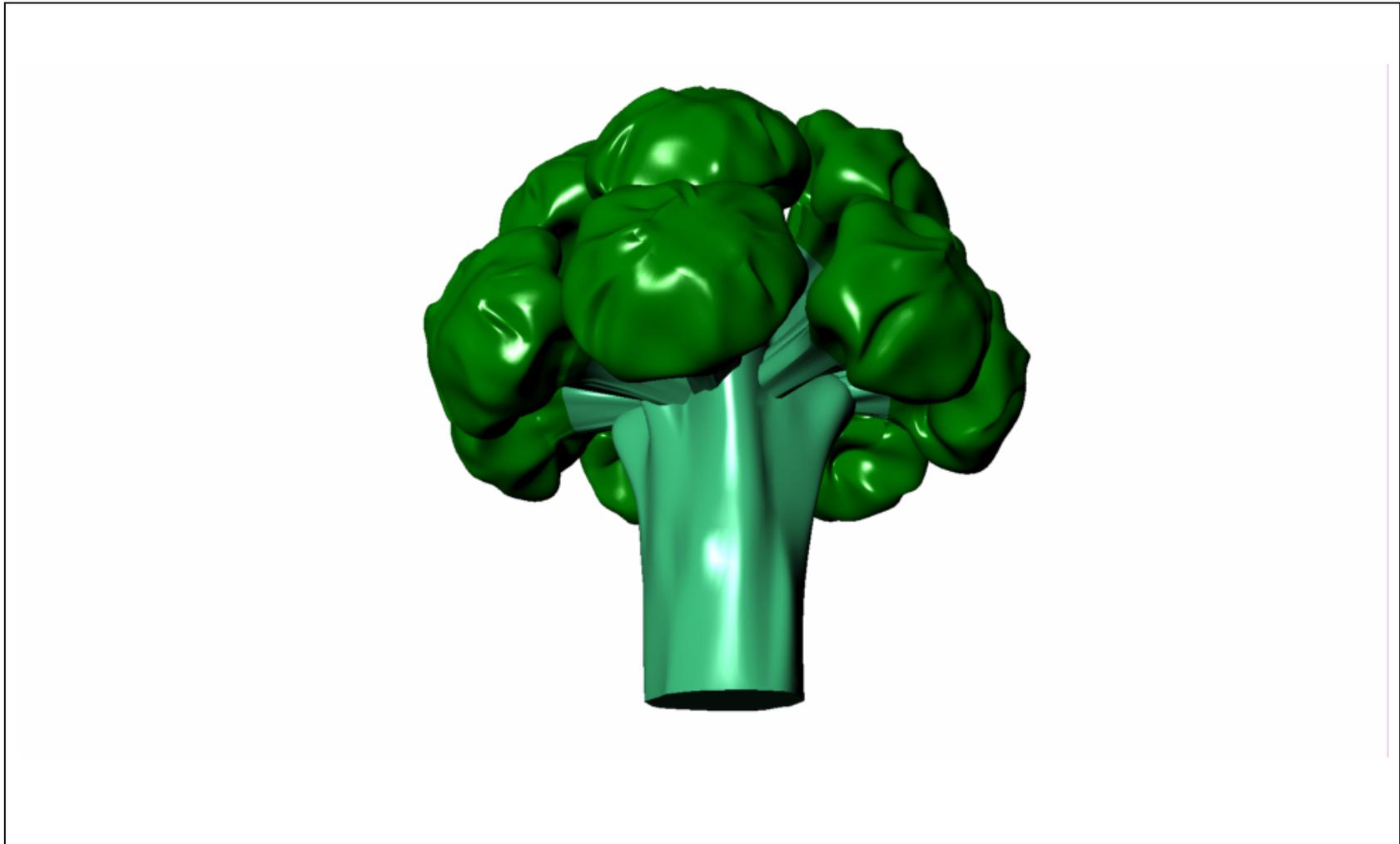
**FIGURA 70. Modelo digital 3D del brócoli “2” en Rhinoceros©.**



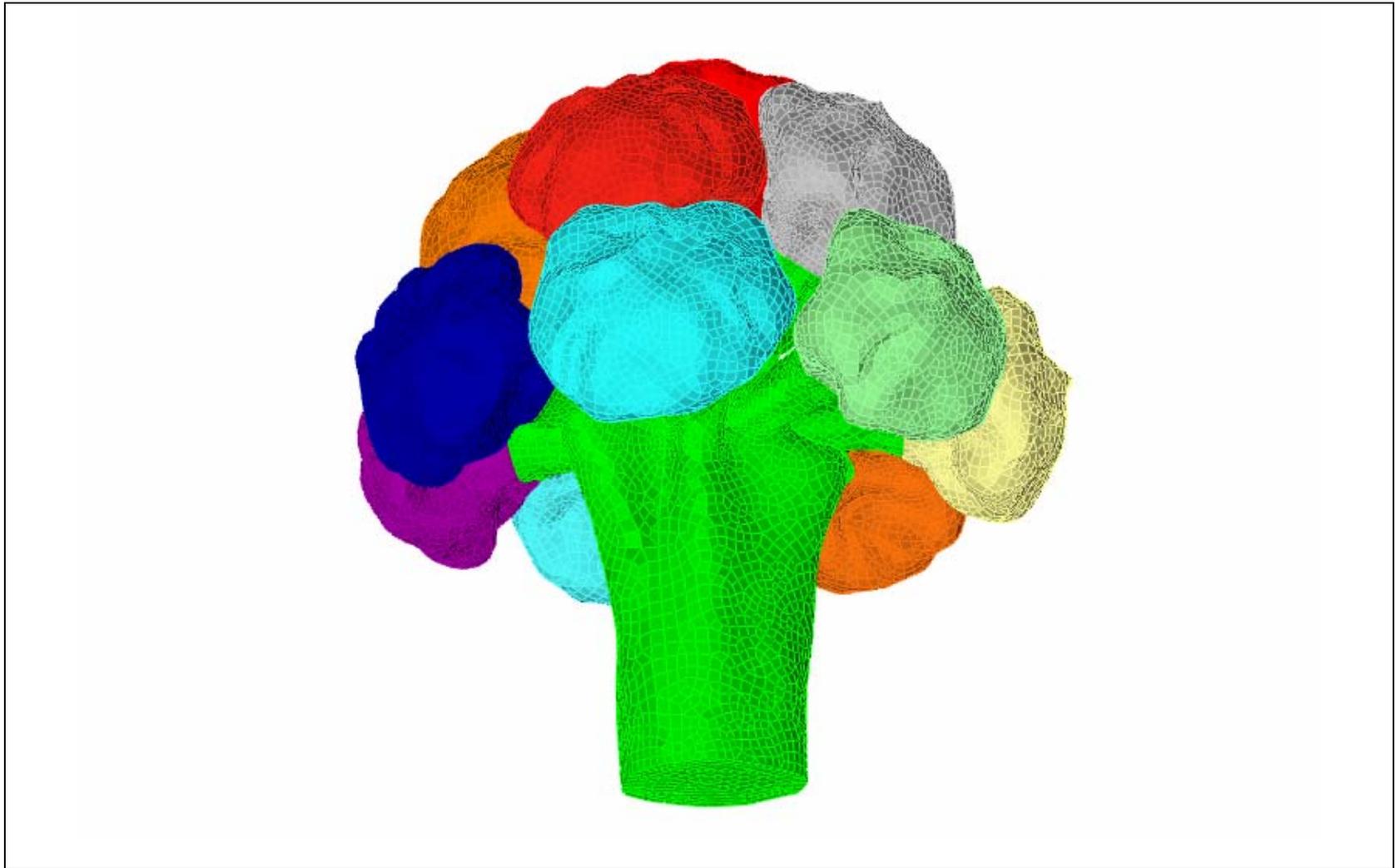
**FIGURA 71. Modelo mallado del brócoli “2” en ALGOR©.**



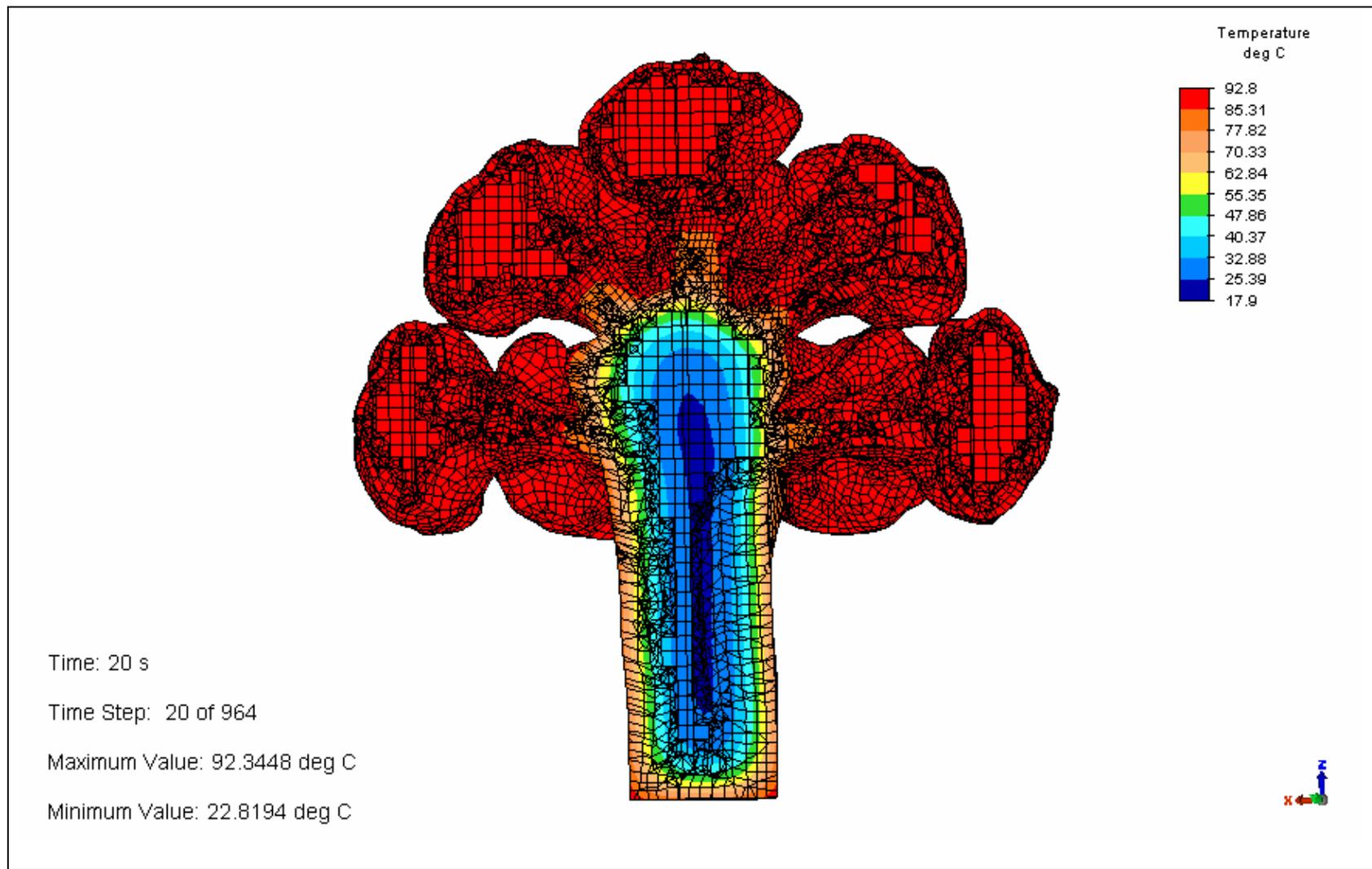
**FIGURA 72. Corte longitudinal del diagrama de contorno del brócoli “2” en ALGOR©.**



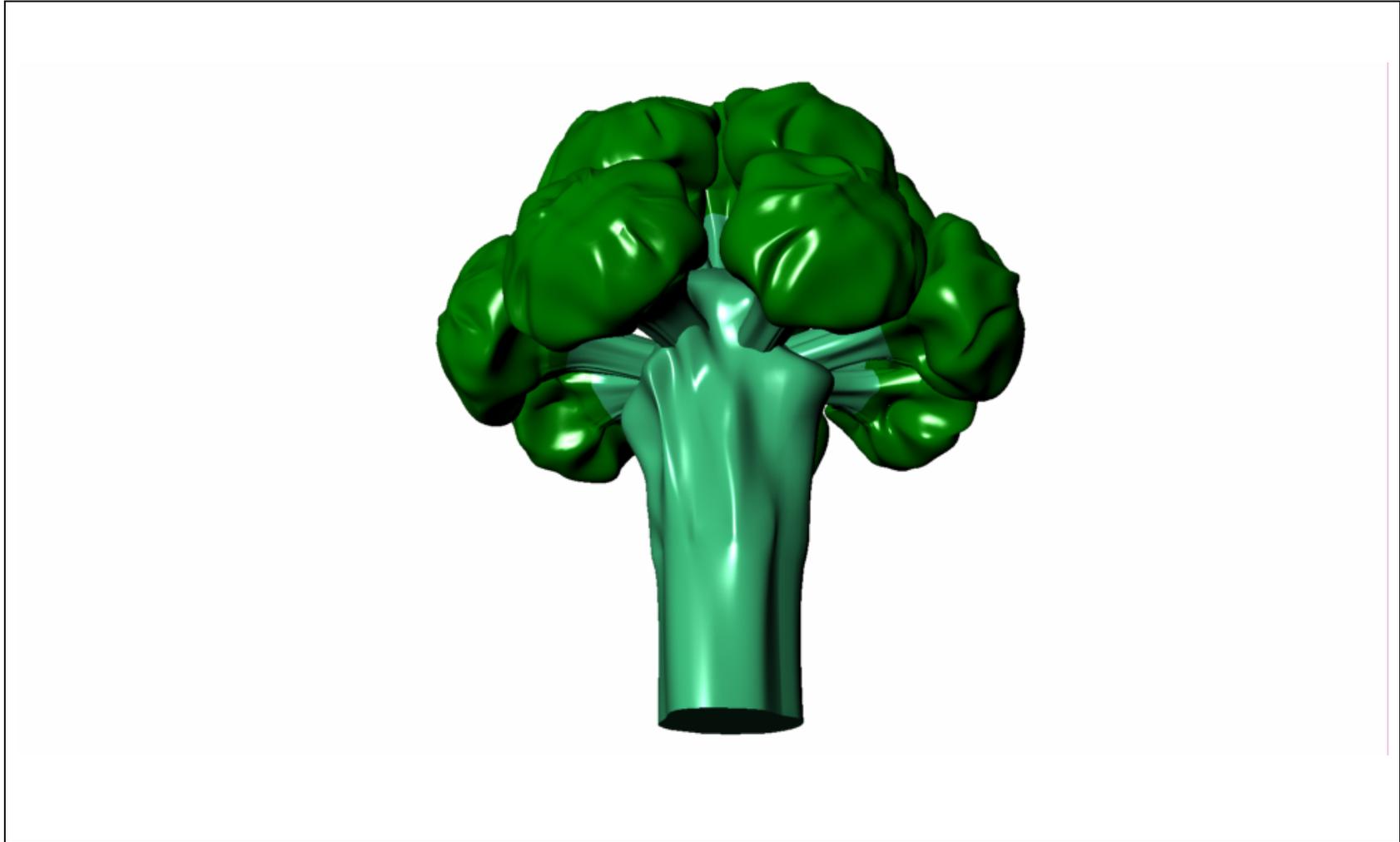
**FIGURA 73.** Modelo digital 3D del brócoli “3” en Rhinoceros©.



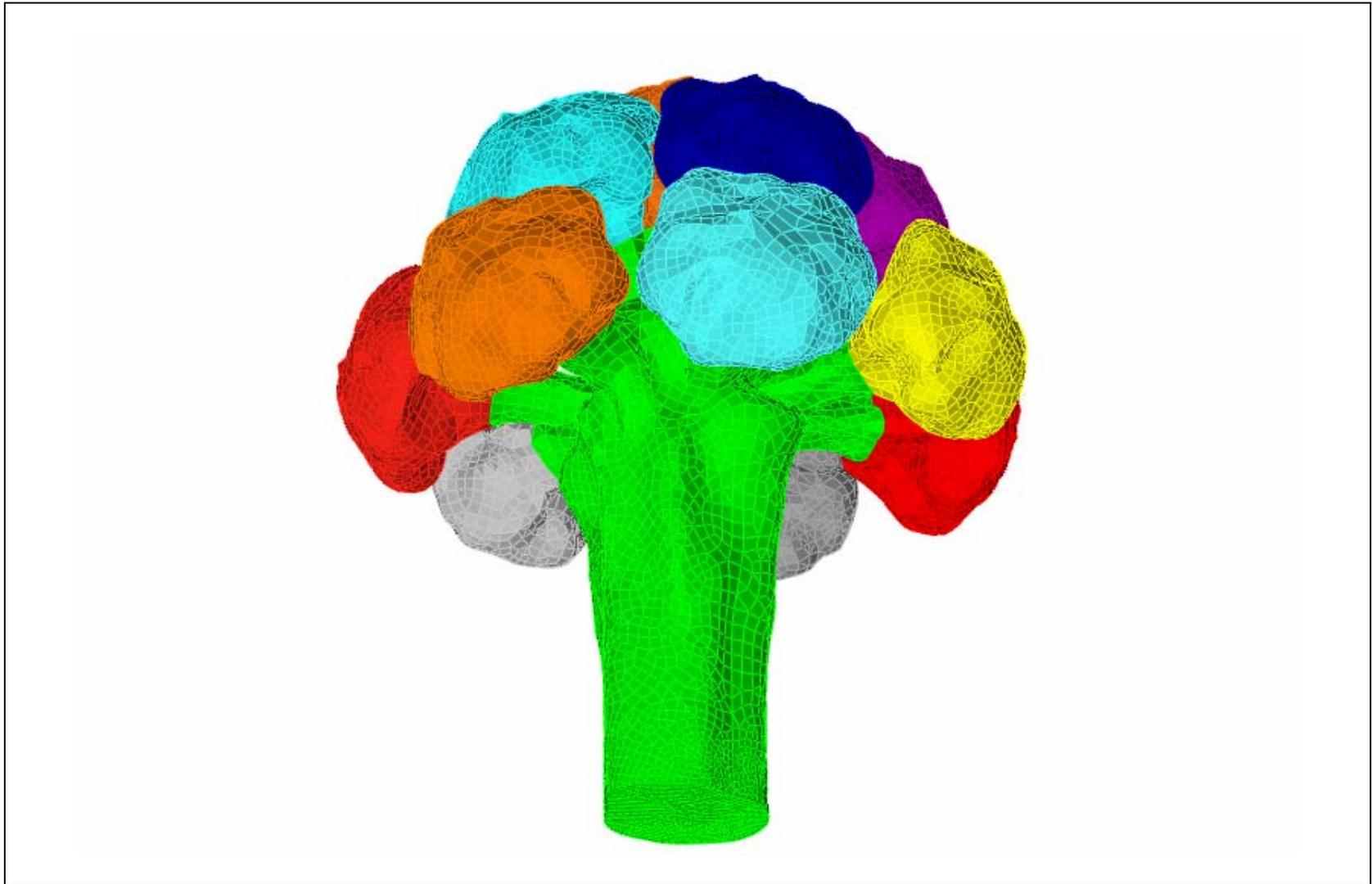
**FIGURA 74. Modelo mallado del brócoli “3” en ALGOR©.**



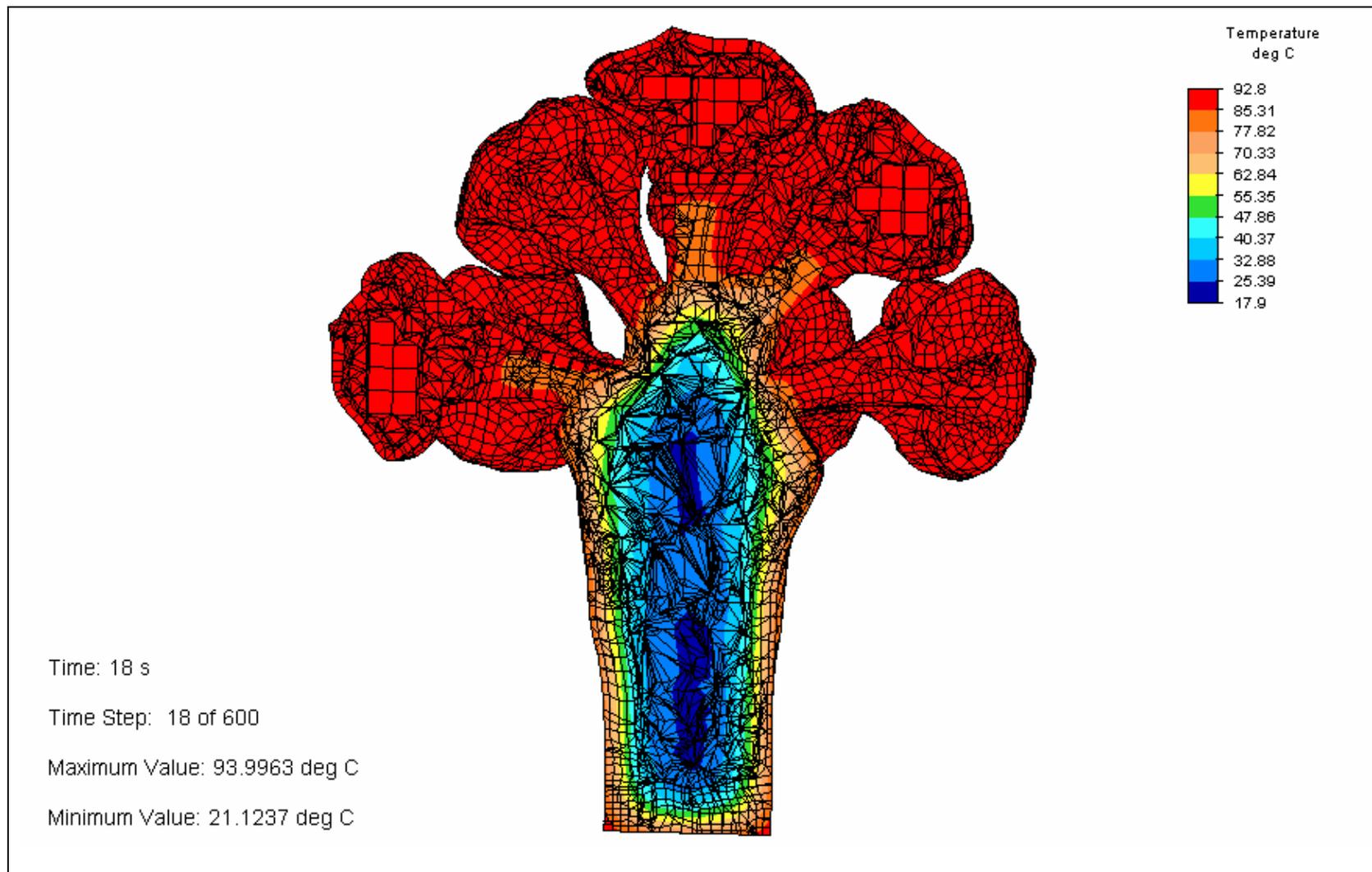
**FIGURA 75. Corte longitudinal del diagrama de contorno del brócoli “3” en ALGOR©.**



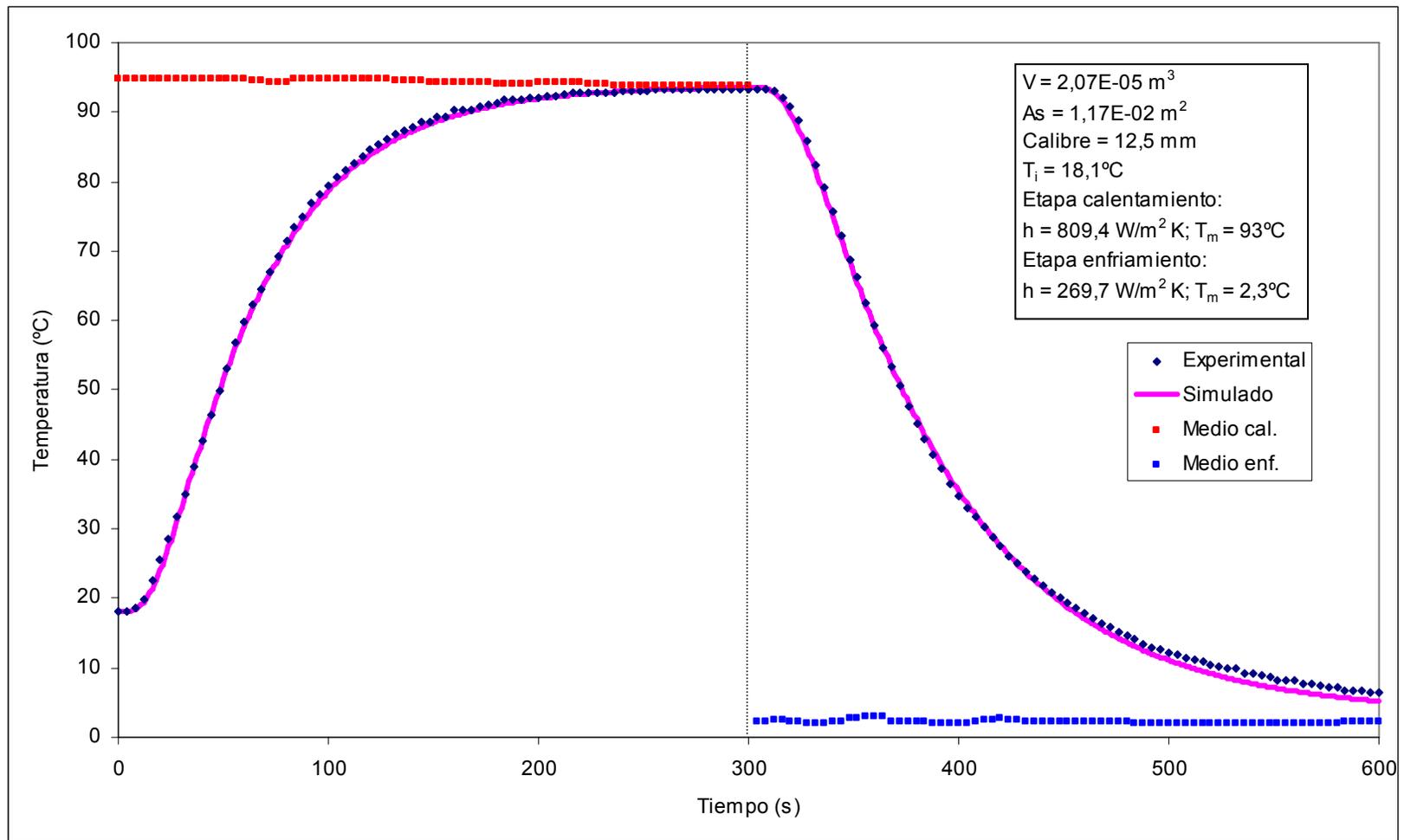
**FIGURA 76. Modelo digital 3D del brócoli “4” en Rhinoceros©.**



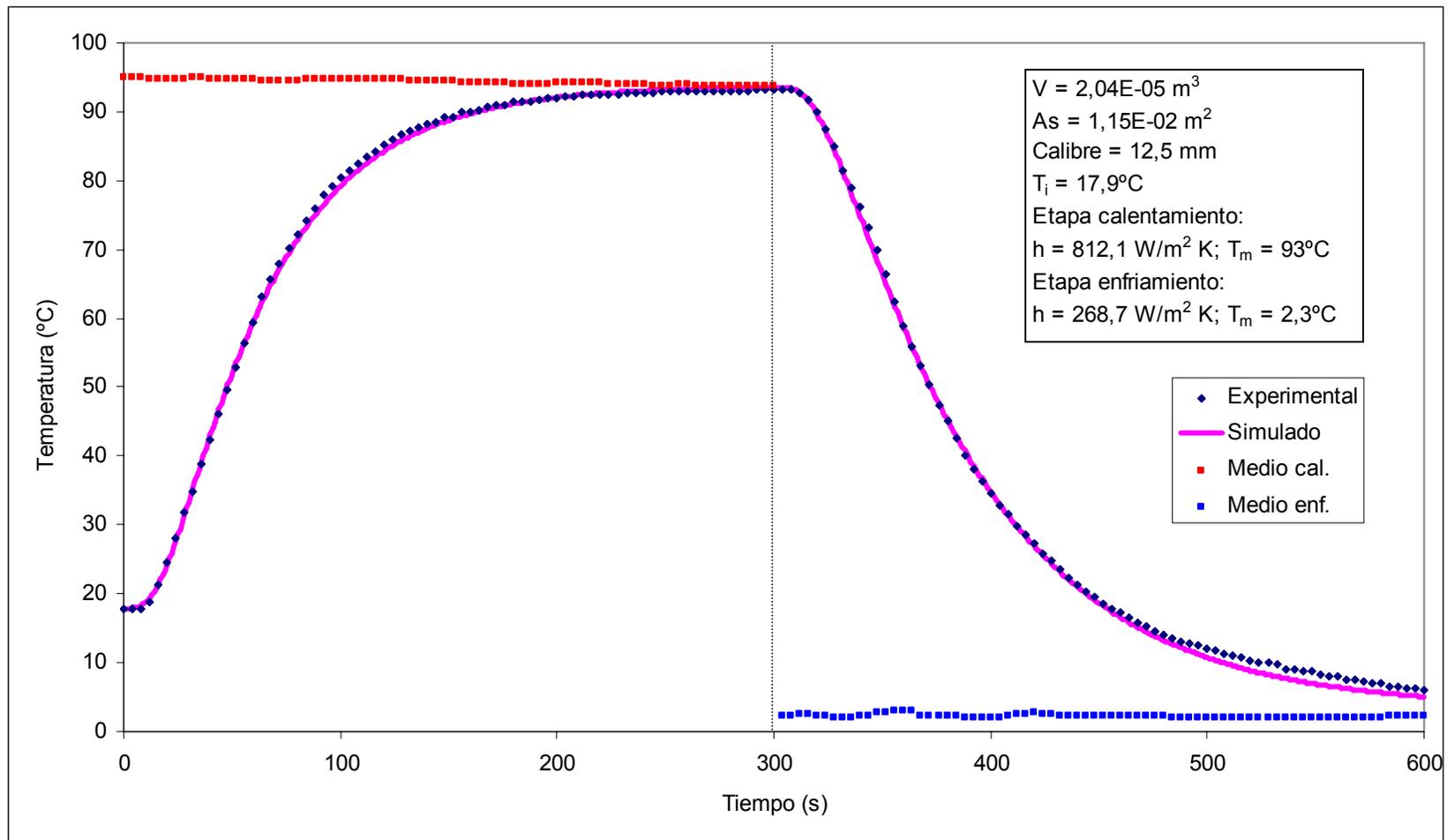
**FIGURA 77. Modelo mallado del brócoli “4” en ALGOR©.**



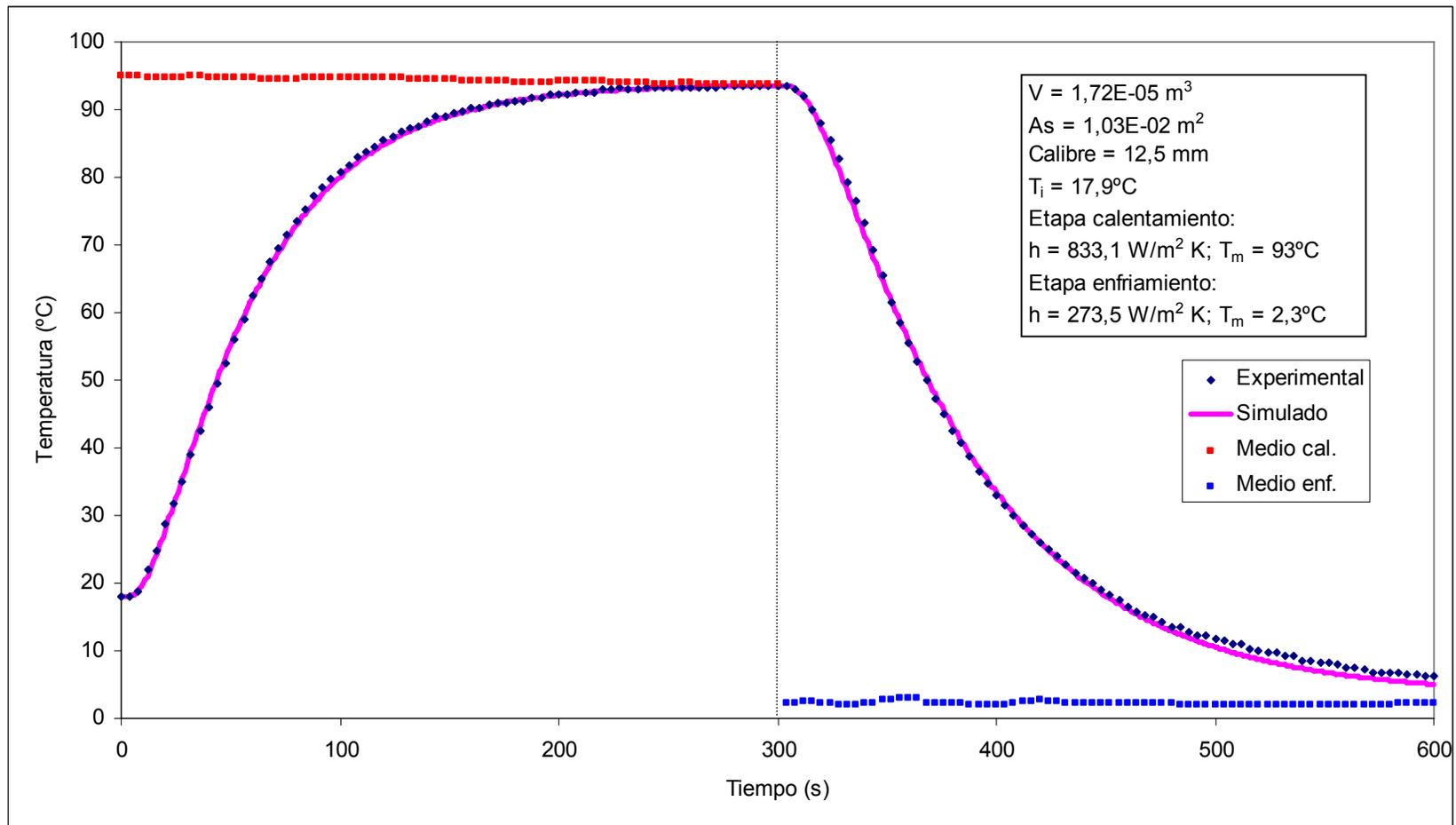
**FIGURA 78. Corte longitudinal del diagrama de contorno del brócoli “4” en ALGOR©.**



**FIGURA 79. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en brócoli “2”.**



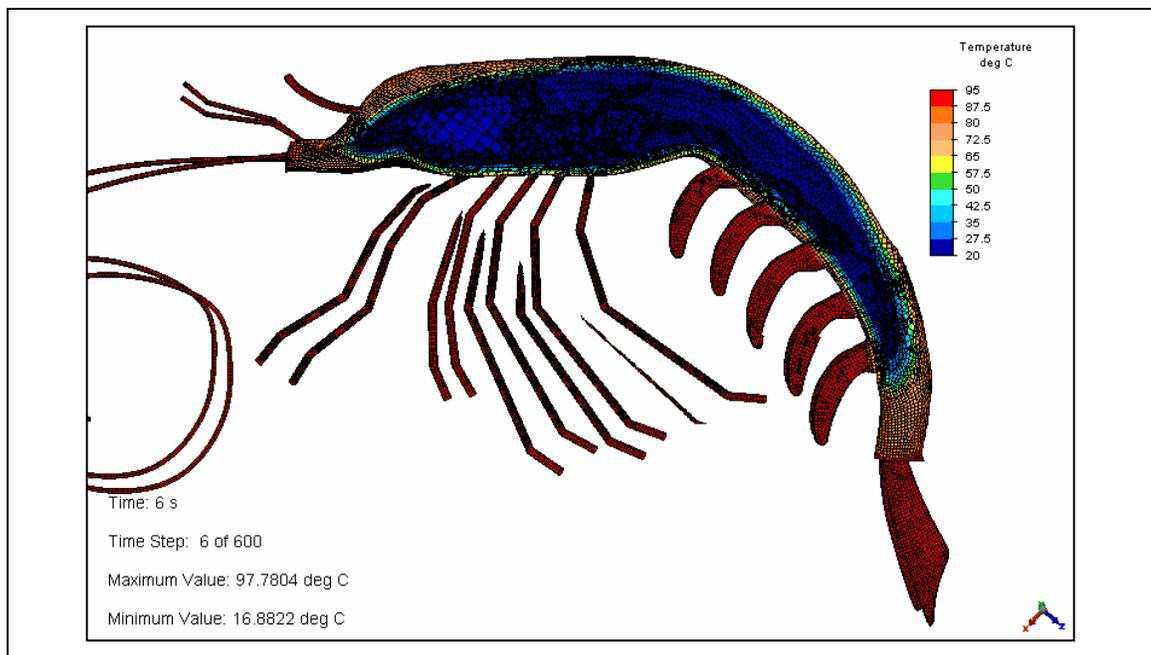
**FIGURA 80. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en brócoli “3”.**



**FIGURA 81. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en brócoli “4”.**

### 4.3 Camarones (Gambas)

Como se dijo en la sección anterior (3.3.4.5), a los modelos digitales de camarón se les agregaron los detalles no presentes en las réplicas, es decir, patas, antenas, etc. Con la finalidad de determinar si estas partes agregadas influían significativamente en la penetración de calor, el modelo detallado del camarón rotulado “1” fue sometido a simulaciones (FIGURA 82) junto con su equivalente sin detalles. De los resultados obtenidos para ambos casos se comparó tanto la ubicación del centro térmico como su perfil de temperatura. Los resultados obtenidos mostraron que la variación en la ubicación del centro térmico fue de apenas 0,2 mm. Además, al comparar ambos perfiles de temperatura se obtuvo un RMSE(%) de apenas 1,8%. Ambos resultados llevaron a la decisión de trabajar con los modelos de camarones sin patas y antenas, ya que estos detalles no influenciaban significativamente la penetración de calor.



**FIGURA 82. Diagrama de contorno de un análisis inicial del modelo digital detallado del camarón “1”.**

Los resultados obtenidos para los camarones se presentan a continuación:

**4.3.1 Modelo digital 3D.** Los modelos 3D obtenidos por la digitalización de las réplicas de yeso de los 3 camarones seleccionados se pueden observar en la FIGURA 83, FIGURA 86 y FIGURA 89. Puede observarse el grado de detalle logrado en los camarones capturados, obteniéndose modelos digitales listos para ser utilizados en el software de simulación ALGOR©.

**4.3.2 Modelo mallado.** Los modelos digitales con su malla generada en ALGOR© pueden observarse en la FIGURA 84, FIGURA 87 y FIGURA 90. El hecho de que ALGOR© haya podido generar la malla indica que el modelo digital capturado es válido para realizar un análisis de elementos finitos.

**4.3.3 Diagramas de contorno.** En la FIGURA 85, FIGURA 88 y FIGURA 91 se pueden observar cortes longitudinales de las simulaciones resultantes de los camarones en ALGOR©. Los resultados se muestran en forma de diagramas de contorno en colores, indicándose el rango que cada color representa en una leyenda (extremo superior derecho). Se puede ir avanzando en cada paso de tiempo (*Time Step*, extremo inferior izquierdo) para ver cómo el calor va penetrando el alimento, mostrándose colores rojizos para las temperaturas más altas, y azulados para las más bajas.

**4.3.4 Estadísticas de los modelos en ALGOR®.** En el Estadísticas de los modelos en ALGOR®. En el CUADRO 21 se presentan las estadísticas resultantes para los modelos en los análisis realizados en ALGOR® para cada camarón:

**CUADRO 21. Estadísticas de los modelos digitales de camarón en ALGOR®.**

<i>Item</i>	<i>Camarón</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Nº de elementos generados</i>	50922	57172	25543
<i>Nº de nodos generados</i>	24891	27014	12940
<i>Espacio ocupado en disco duro (MB)</i>	2090,852	2320,592	1061,917
<i>Tiempo total simulación (min)</i>	386,770 (6,4 h)	437,647 (~7,3 h)	194,488 (~3,2 h)

En el CUADRO 21 se puede ver que los tiempos de simulación alcanzan a ser sólo de algunas horas, como el caso de los espárragos, debido a que los modelos digitales no presentaban gran complejidad en su superficie, comparados a los modelos digitales de los brócolis en que las simulaciones tomaron días. También se puede ver que para el camarón 3 la cantidad de elementos y nodos generados es considerablemente menor a los otros dos, llegando a ser menor a la mitad de los demás. Esto se debe a que el camarón 3 era de menor tamaño (menor volumen y área superficial), lo que hizo que se generaran pocos elementos y nodos en comparación a los otros dos de tamaño mayor, ocupando por lo tanto menos espacio en disco y menos tiempo de simulación.

**4.3.5 Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados.** Al igual que para los turiones de espárrago y floretes de brócoli, en el modelo digital del camarón se debió localizar aquel nodo cuya ubicación espacial fuese similar a la ubicación del punto de medición experimental donde fue insertada la termocupla. Para el caso de los camarones 1 y 2, los cuales

eran más grandes, se ubicó el nodo correspondiente a  $3 \pm 0.1$  cm medidos en el eje Z desde la unión del cefalotórax (cabeza) con el abdomen (cola). Similar procedimiento se usó para el camarón 3, al cual se le ubicó este nodo a  $1,5 \pm 0.1$  cm del eje Z. Aquellos nodos evaluados y su ubicación para cada modelo digital de camarón se detallan en el CUADRO 22. Fue de este nodo que se obtuvo su perfil de temperatura y se comparó con su correspondiente perfil experimental para cada camarón.

**CUADRO 22. Características del nodo evaluado para los camarones digitales.**

<i>Item</i>	<i>Camarón</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Nº nodo evaluado</i>	20515	20760	11245
<i>Ubicación espacial del nodo evaluado (eje Z) (m)</i>	0,0300453	0,0300906	0,0151278

A su vez, en el CUADRO 23 se muestran las características del nodo correspondiente al centro térmico o punto de más lento calentamiento/enfriamiento para cada camarón.

**CUADRO 23. Características del nodo correspondiente al centro térmico en los camarones digitales.**

<i>Item</i>	<i>Camarón</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Nº nodo</i>	21356	22914	11045
<i>Ubicación espacial del nodo (eje Z) (m)</i>	-0,00985701	-0,00283308	-0,00308161

En el CUADRO 23 se puede observar que la ubicación (nodo) del centro térmico en cada camarón difiere de la del nodo evaluado (CUADRO 22). La coordenada negativa del centro térmico se debe a que éste se encontraba en el cefalotórax del camarón, esto es, bajo la unión de éste con el abdomen o cola, quedando tridimensionalmente ubicado bajo el plano formado por los ejes X e Y, o sea, en las coordenadas negativas del eje Z.

En la FIGURA 92, FIGURA 93 y FIGURA 94 se muestran las gráficas comparativas de los perfiles de temperatura experimentales y simulados de los tratamientos de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en camarones. Al igual que en los casos de los turiones de espárragos y floretes de brócoli, se puede observar en estas gráficas que el software ALGOR® describe las características de retardo inicial o “lag” y la “inercia térmica”.

**4.3.6 Valores de RMSE.** La bondad del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales fue expresada mediante el RMSE expresado tanto en términos absolutos (°C) como relativos (%), valores que se pueden ver en el CUADRO 24.

**CUADRO 24. Valores de RMSE para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en camarones.**

<i>Camarón</i>	<i>Hidrocalentamiento</i>		<i>Hidrogenfriamiento</i>		<i>Proceso global</i>	
	<i>RMSE (°C)</i>	<i>RMSE (%)</i>	<i>RMSE (°C)</i>	<i>RMSE (%)</i>	<i>RMSE (°C)</i>	<i>RMSE (%)</i>
1	0,52	1,44	1,25	8,75	0,95	6,25
2	0,31	0,49	1,49	9,09	1,07	6,42
3	0,84	2,68	0,87	4,70	0,85	3,82

De los resultados mostrados en el CUADRO 24, se puede inferir que no existen diferencias entre los perfiles de temperatura experimentales y simulados de los

camarones, ya que los valores de RMSE(%) indican un buen ajuste al encontrarse por debajo del criterio ingenieril adoptado de 10%. En la etapa de hidrocalentamiento estos valores fueron muy bajos, siendo menores al 2,68% (correspondiente a un RMSE de 0,84 °C), llegando a 0,49% (RMSE de 0,31 °C) para el caso del camarón 2. En la etapa de hidrogenfriamiento, en cambio, se encontraron valores superiores al 8,75% (RMSE de 1,25 °C) para los camarones 1 y 2. El camarón 3 se ajustó mejor, con un 4,7% (RMSE de 0,87 °C). Además, para el proceso global también los valores de RMSE(%) se encontraron bajo el 10%, siendo inferiores al 6,42% (RMSE de 1,07°C).

Lo descrito anteriormente demuestra la adecuada descripción del proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en camarones mediante simulación computacional por el Método de Elementos Finitos con el software ALGOR®.



**FIGURA 83. Modelo digital 3D del camarón “1” en Rhinoceros©.**

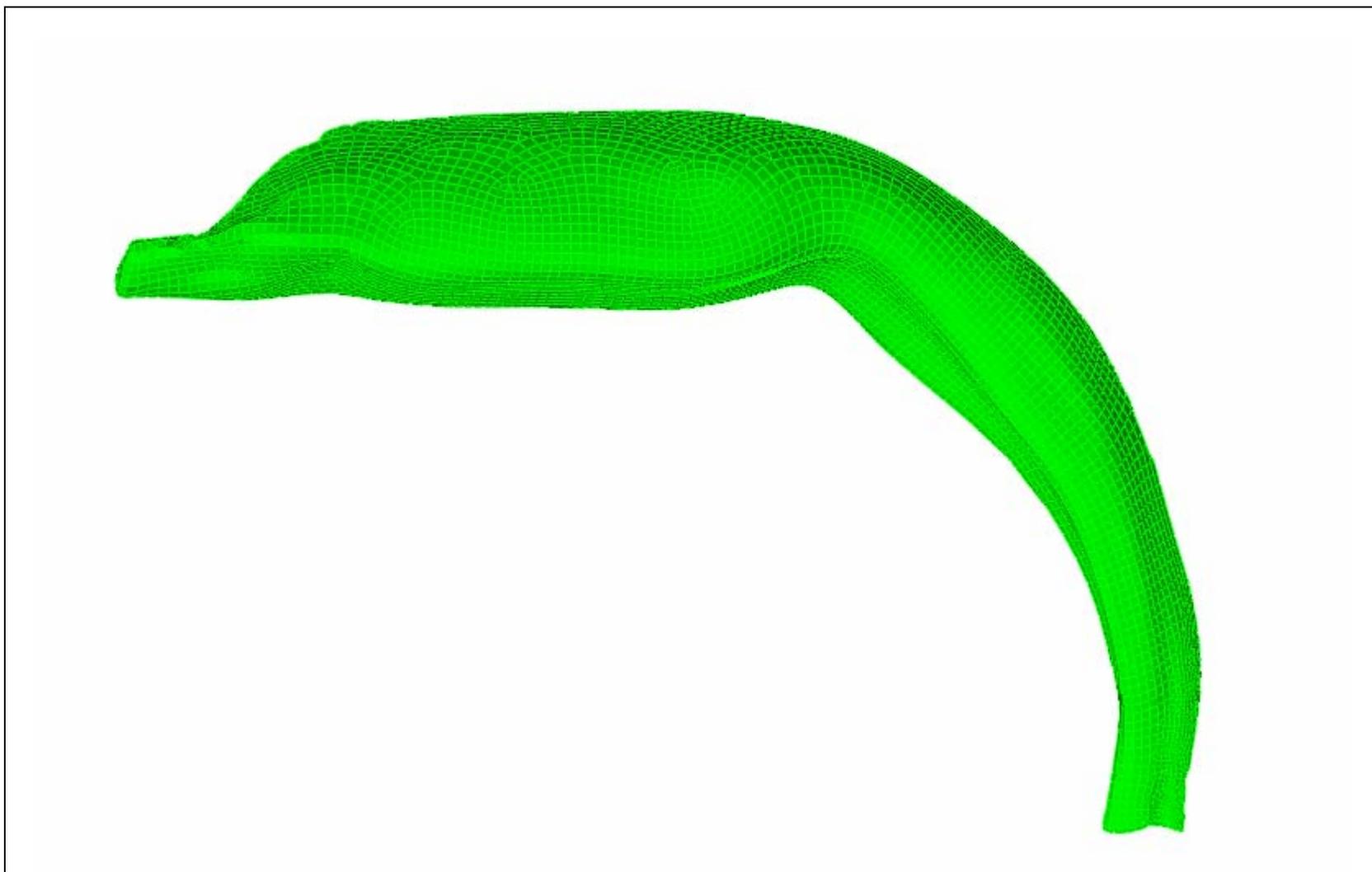
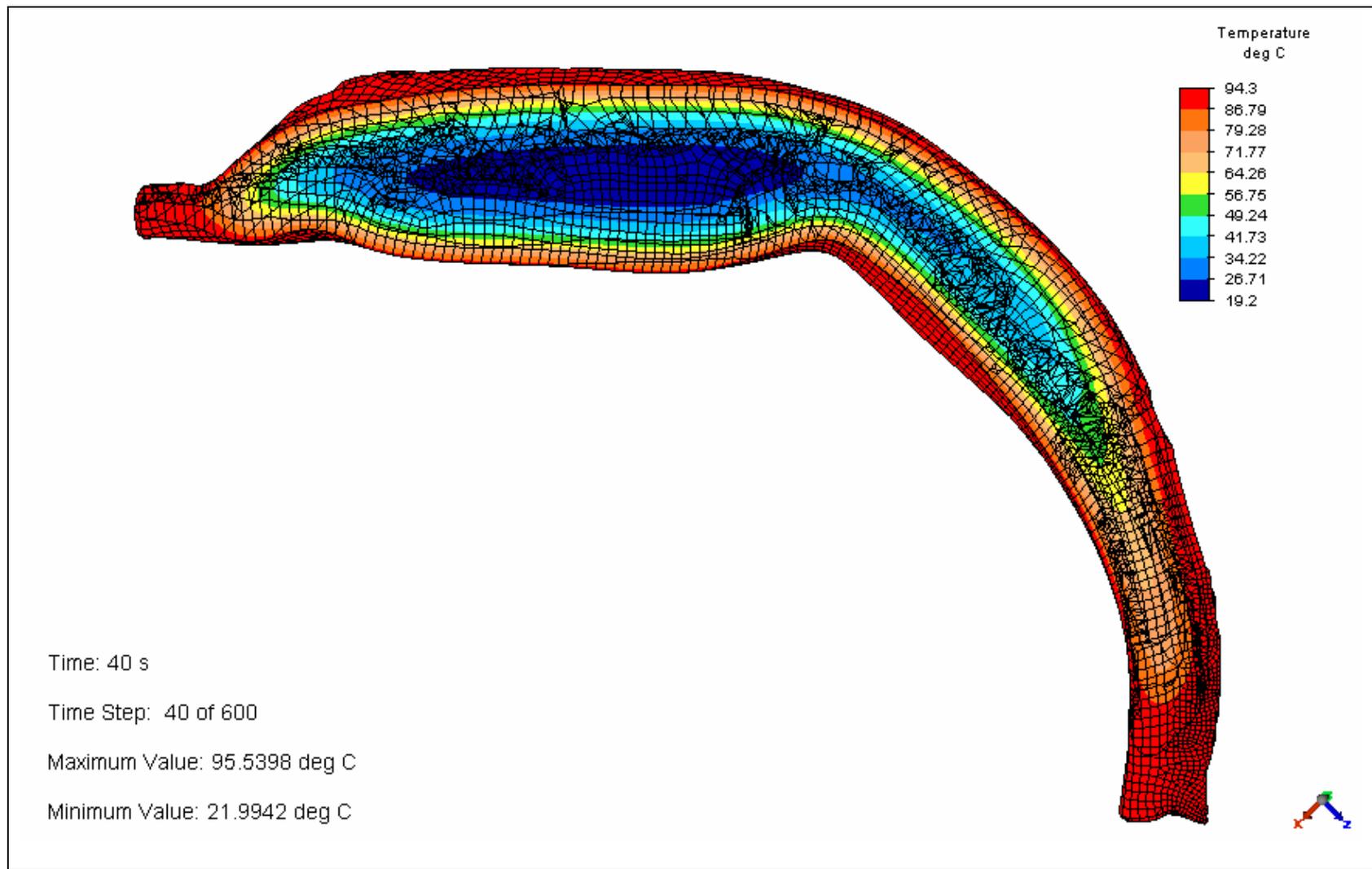


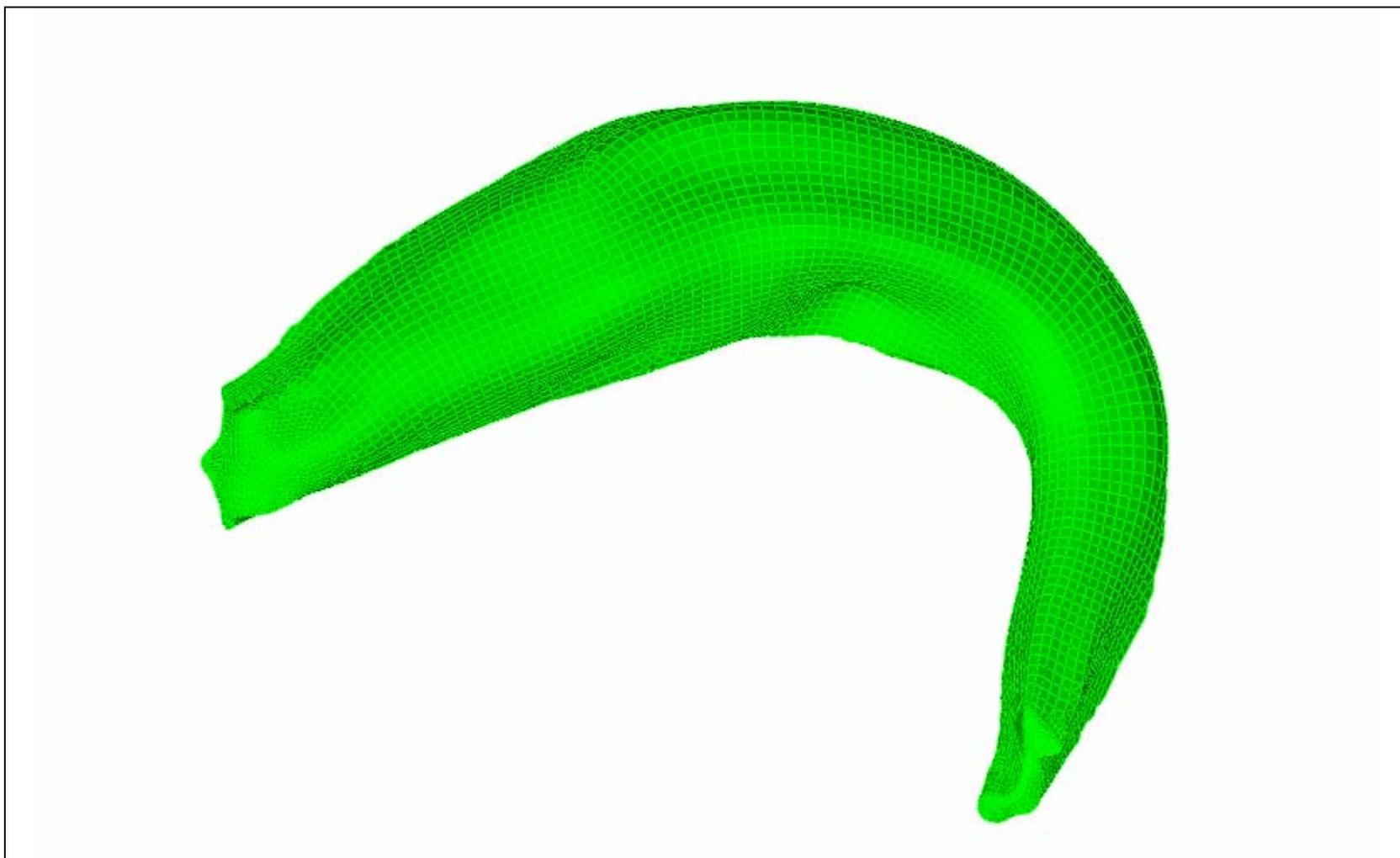
FIGURA 84. Modelo mallado del camarón "1" en ALGOR©.



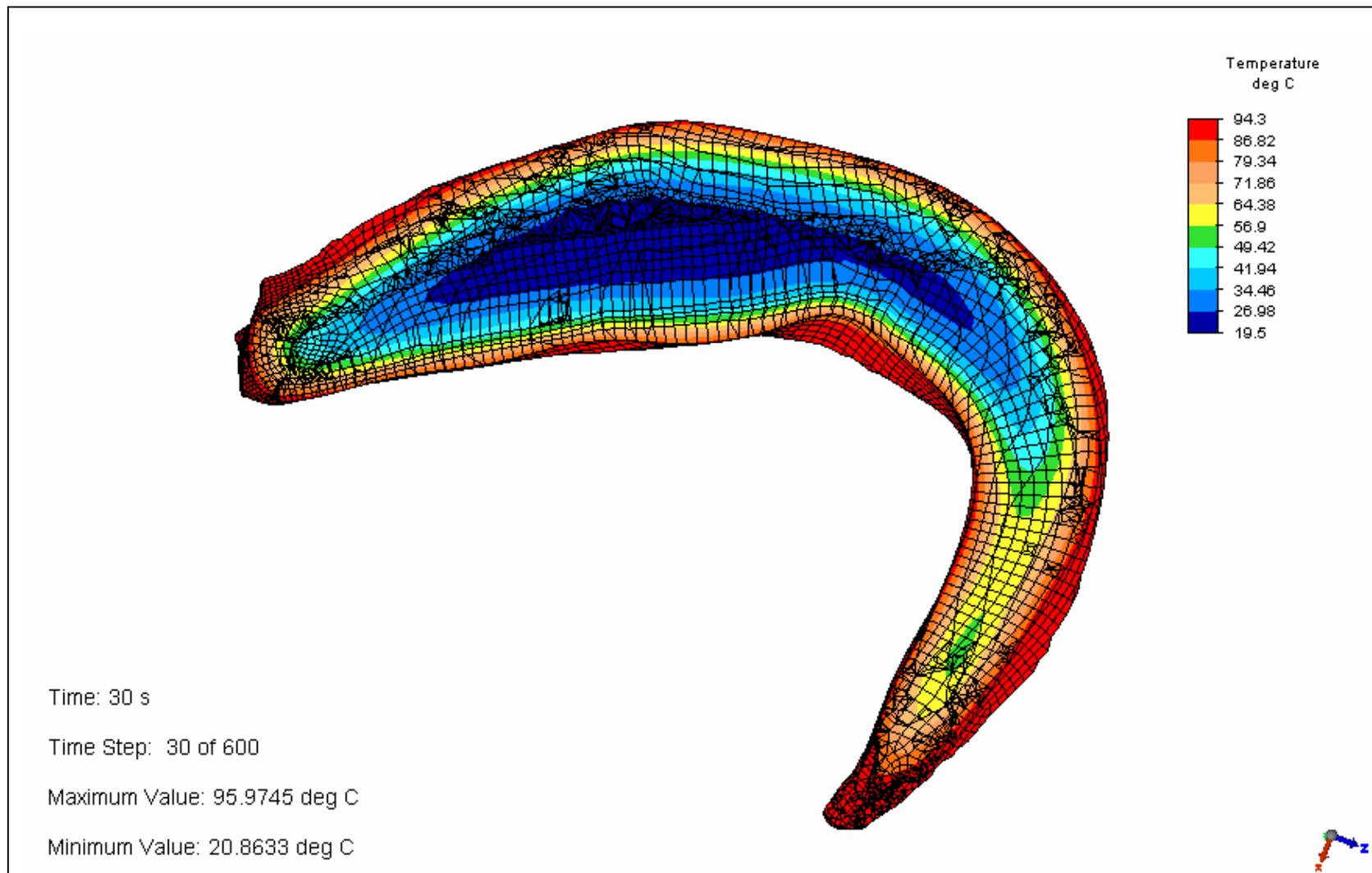
**FIGURA 85. Corte longitudinal del diagrama de contorno del camarón “1” en ALGOR©.**



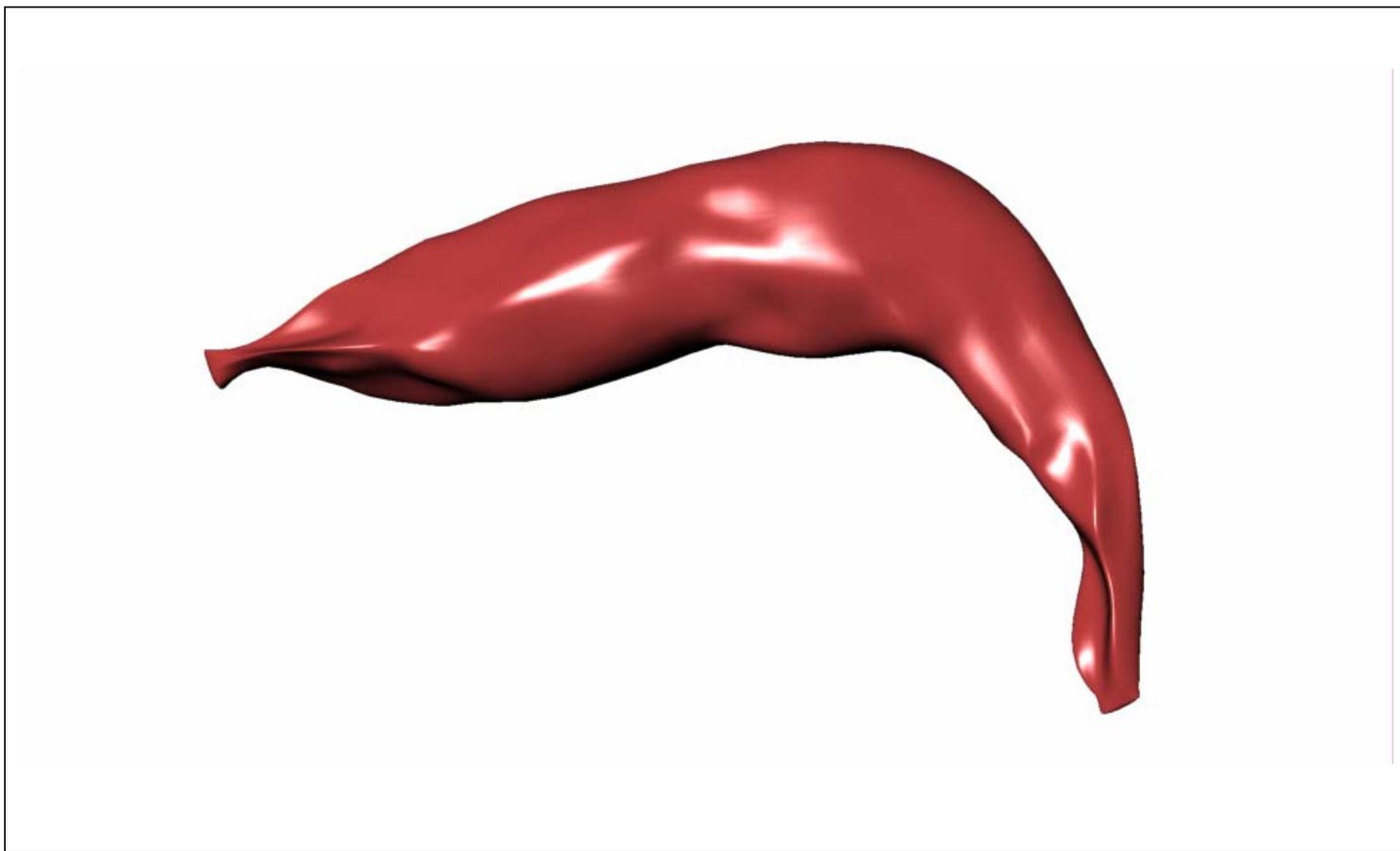
**FIGURA 86. Modelo digital 3D del camarón “2” en Rhinoceros©.**



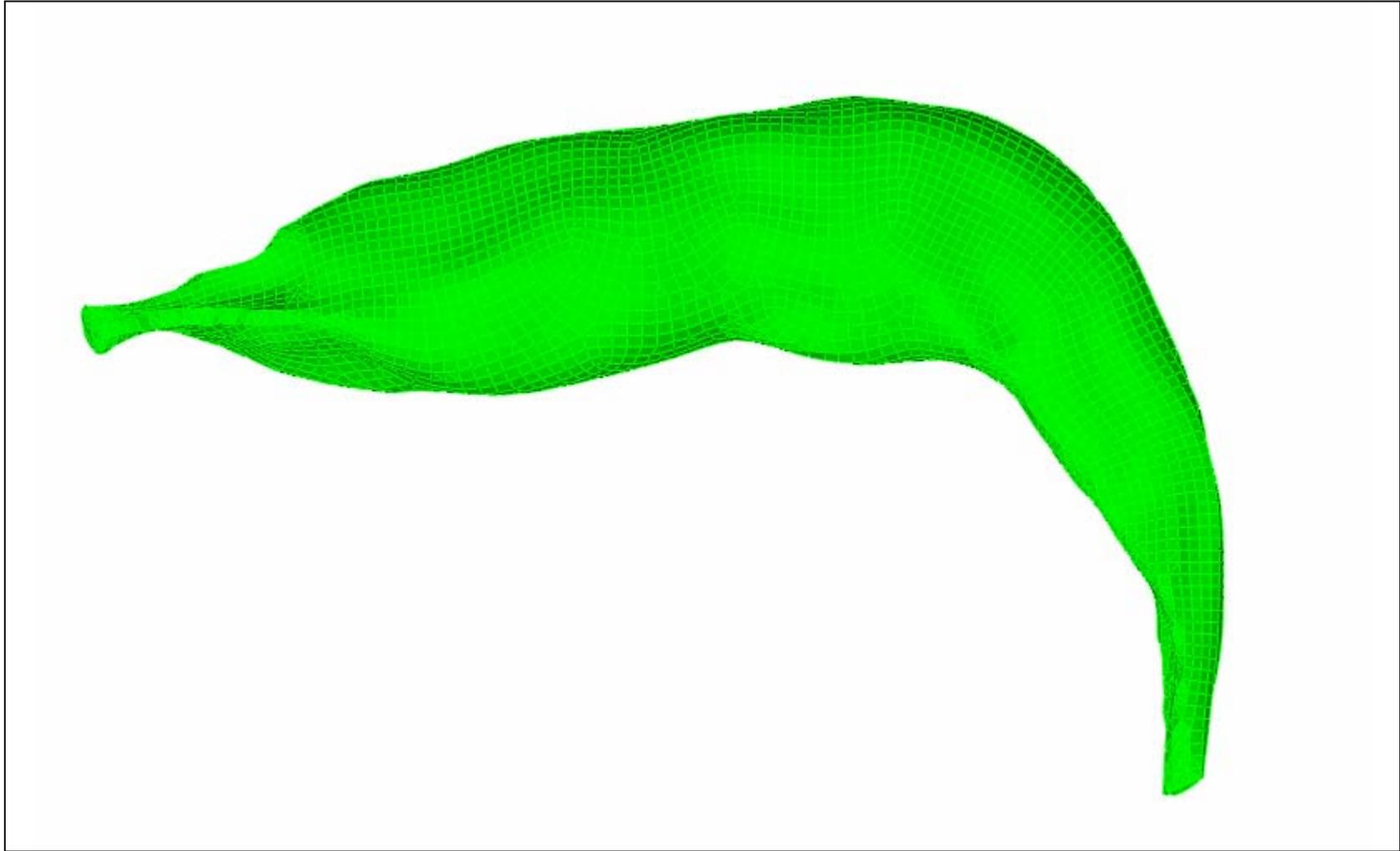
**FIGURA 87. Modelo mallado del camarón “2” en ALGOR©.**



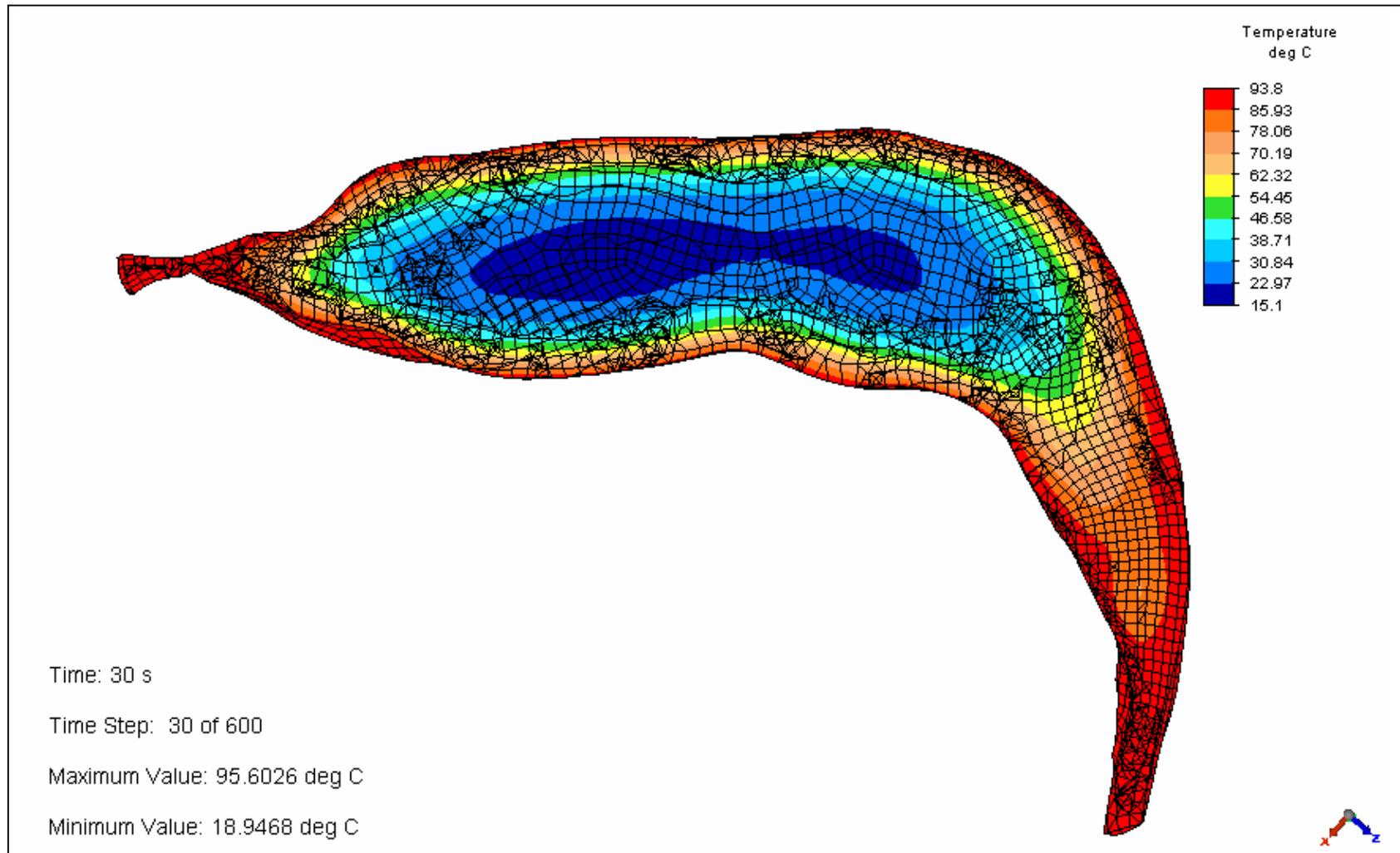
**FIGURA 88. Corte longitudinal del diagrama de contorno del camarón “2” en ALGOR©.**



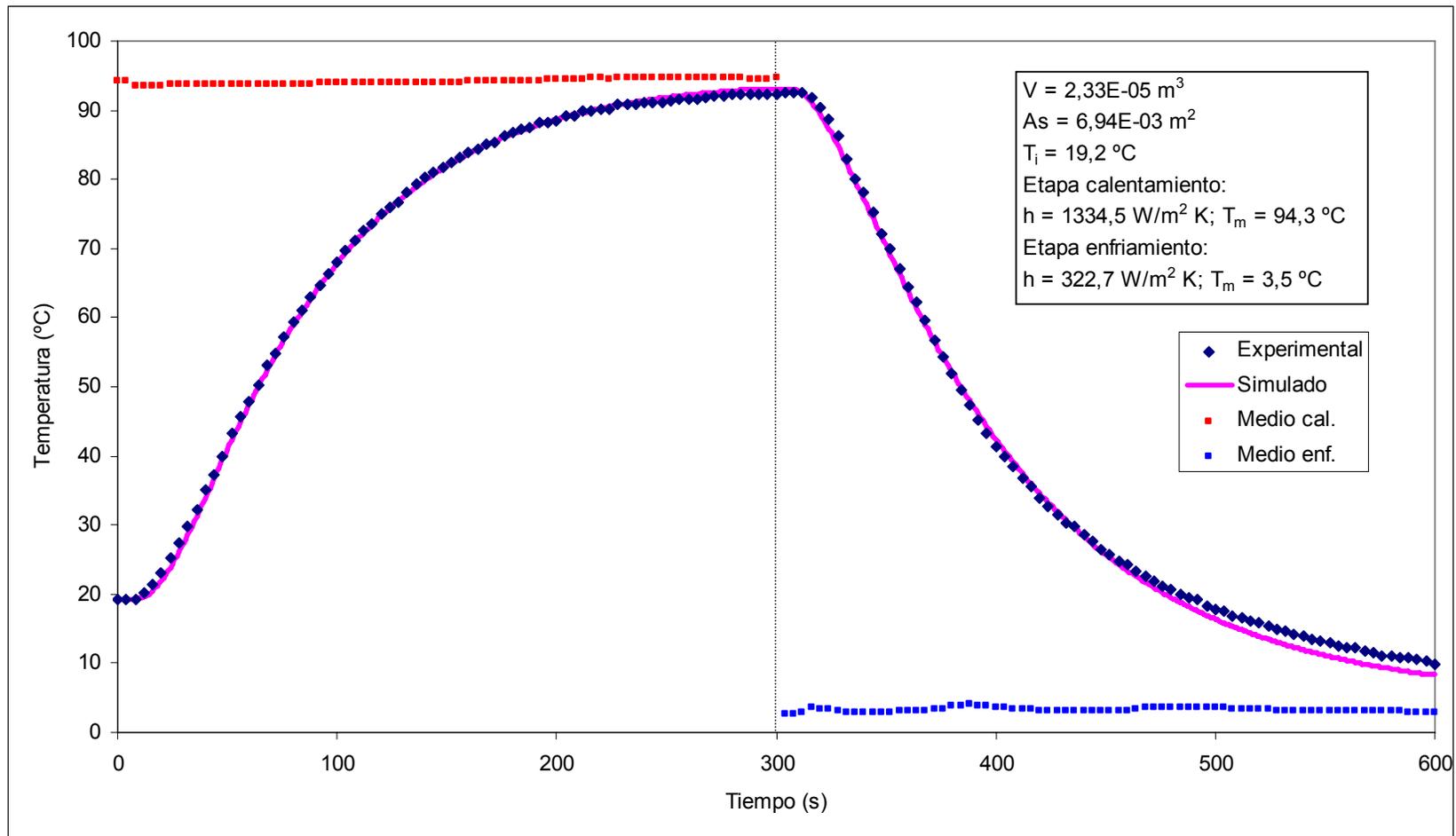
**FIGURA 89. Modelo digital 3D del camarón “3” en Rhinoceros©.**



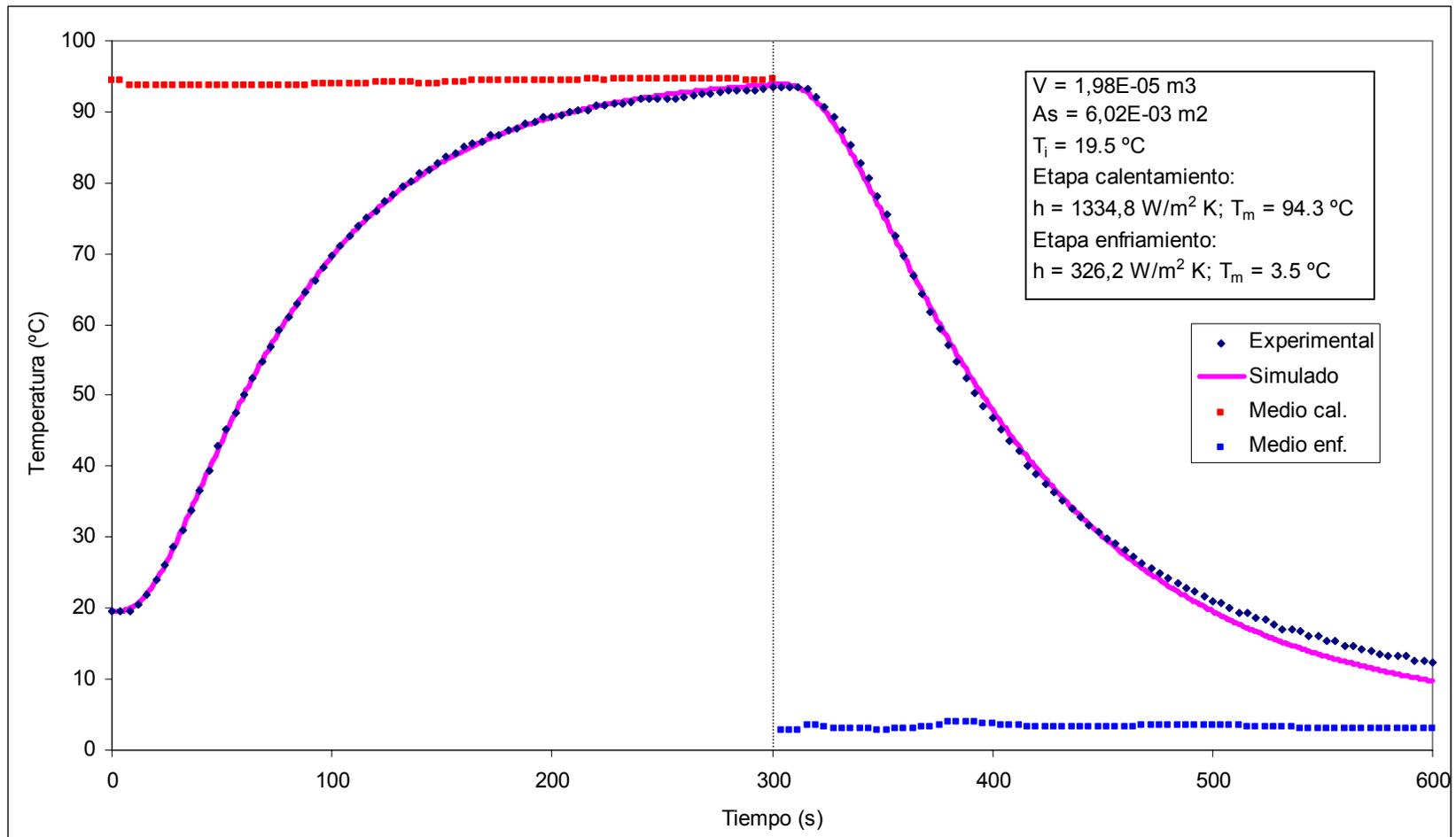
**FIGURA 90. Modelo mallado del camarón "3" en ALGOR©.**



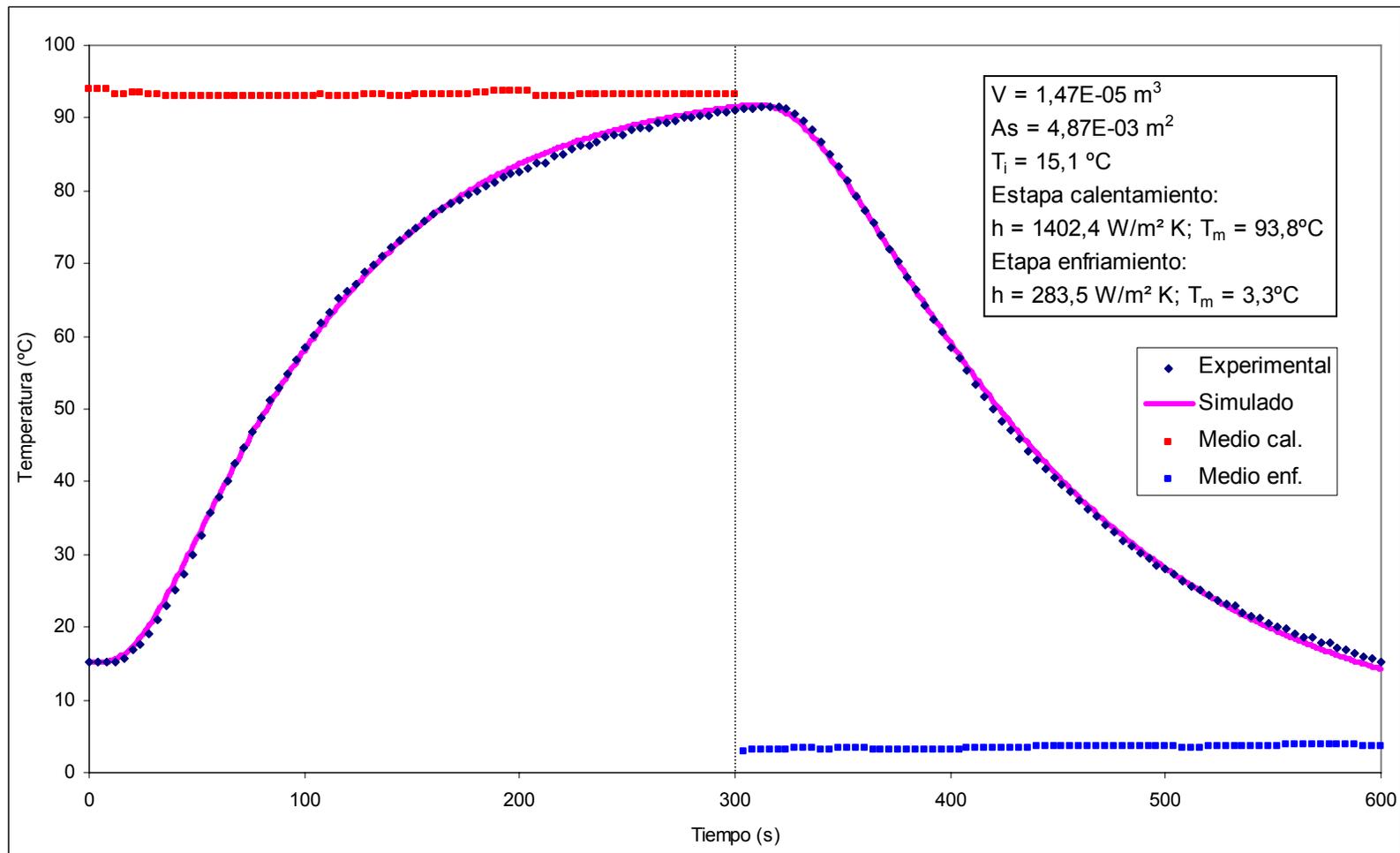
**FIGURA 91. Corte longitudinal del diagrama de contorno del camarón “3” en ALGOR©.**



**FIGURA 92. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en camarón "1".**



**FIGURA 93. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento en camarón "2".**



**FIGURA 94. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso combinado de hidrocalentamiento/hidrogenfriamiento en camarón “3”.**

## 5 CONCLUSIONES

- El método de digitalización mediante el brazo MicroScribe-3DL permitió capturar la forma real de los alimentos, obteniéndose modelos digitales 3D con un nivel de detalle muy aceptable (Ej. Turiones de Espárrago). Sin embargo, en algunas situaciones puede ser necesario complementar el nivel de detalle mediante un modelado 3D con el software Rhinoceros©. En el presente trabajo, se modeló las yemas florales en los floretes de brócoli debido a la inaccesibilidad de éstas partes para la punta del brazo digitalizador; otro ejemplo, fue el modelado de las partes muy pequeñas y finas del camarón como las antenas y patas que no pudieron obtenerse en las réplicas de yeso.
- El software de simulación ALGOR®, basado en el Método de elementos finitos, permitió realizar simulaciones de procesos de conducción de calor sin cambio de fase sobre los modelos digitales 3D de los alimentos evaluados. Los modelos digitales fueron factibles de ser importados directamente desde el formato del archivo del software Rhinoceros©, conservando toda su información geométrica tanto en tamaño y forma. De esta manera se pudo comprobar la versatilidad del software ALGOR® para trabajar con formas irregulares complejas, posibilitando observar la asimetría en la penetración de calor en los alimentos evaluados así como ubicar el punto de más lento calentamiento/enfriamiento gracias a su capacidad de entregar información detallada en forma gráfica y numérica.
- Los resultados obtenidos demostraron un buen ajuste entre los perfiles experimentales y los simulados, siendo los valores del Error Estándar de Estimación o RMSE (%) inferiores al criterio adoptado de 10% en todos los

casos, tanto para la etapa de hidrocalentamiento como para la de hidrogenfriamiento y para el proceso global. Los valores más bajos se encontraron en la etapa de hidrocalentamiento, oscilando entre 0,49% y 2,68% de RMSE, correspondiendo ambos límites a los camarones. En la etapa de hidrogenfriamiento, se encontraron también algunos valores bajos, como 3,08% de RMSE en un caso de espárrago, pero predominaron los valores altos, algunos muy cercanos al límite de aceptabilidad propuesto, llegando al 9,99% de RMSE para uno de los floretes de brócoli.

- La metodología propuesta en el presente trabajo de tesis basada en los principios de ingeniería reversa y tecnología de intercambio de datos CAD/CAE puede utilizarse para diseñar o evaluar procesos de hidrocalentamiento o hidrogenfriamiento de alimentos de formas irregulares complejas respecto a su temperatura y tiempo.

## 6 RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue realizar una simulación mediante el método de elementos finitos para predecir la distribución de temperaturas durante procesos de conducción de calor en alimentos de formas irregulares complejas, como turiones de espárragos verdes, floretes de brócoli, y camarones. Se eligió un tratamiento combinado de hidrocalentamiento/hidroenfriamiento para estudiar las distribuciones de temperatura. Debido a la naturaleza altamente perecible de las muestras, se hicieron réplicas en yeso usando material de impresión de alginato y tecnología dental. Luego se realizó una reconstrucción de la superficie y la forma de los productos usando un brazo digitalizador 3D de precisión, con exactitud de punta de aguja de 0,64 mm (Microscribe-3D™, Immersion Co., San José, CA) y un software de modelado basado en NURBS (Non-Uniform Rational B-spline) (Rhinoceros®, Robert McNeel&Associates, Seattle, WA). Esta técnica recupera la forma exacta de la superficie capturando puntos en 3D, dibujando curvas 3D y construyendo superficies 3D directamente de modelos físicos. Luego, el modelo matemático para la conducción de calor en cuerpos irregulares complejos sujeto a condiciones de frontera convectivas constantes fue resuelto usando un software de simulación basado en el Método de Elementos Finitos (ALGOR®, ALGOR Inc., Pittsburgh, PA). Los resultados para el punto de más lento calentamiento de cada producto mostraron un buen ajuste entre los perfiles de temperatura experimentales y simulados. Los valores del error estándar de estimación ó RMSE (*Root Mean Square Error*) obtenidos, expresados en porcentaje, fueron menores al 10,0%. El método propuesto basado en los principios de ingeniería reversa y tecnología de intercambio de datos CAD/CAE pueden usarse para optimizar procesos térmicos de alimentos de formas irregulares complejas respecto a su temperatura y tiempo.

## SUMMARY

The objective of this research was to carry out a finite element analysis simulation for predicting temperature distribution during heat conduction processes in non-symmetric and irregular-shaped foods like asparagus spears, broccoli florets, and shrimps. A combined blanching/hydrocooling treatment was chosen to study temperature distributions. Due to the highly perishable nature of samples, plaster replicas were made using an alginate impression material and dental technology. Then, a reconstruction of the three-dimensional surface and shape of the food products was carried out by using a precision 3-D digitizer, accuracy of stylus tip 0.64 mm (Microscribe-3D™, Immersion Co., San José, CA) and a NURBS (Non-Uniform Rational B-spline) modelling software (Rhinoceros®, Robert McNeel&Associates, Seattle, WA). This technique recovers exact surface shape by capturing 3D points, sketching 3D curves, and building 3D surfaces directly from physical models. Afterwards, the mathematical model for heat conduction of the digitized non-symmetric and irregular-shaped bodies under constant convective boundary conditions was solved using a Finite Element Analysis and Simulation software package (ALGOR®, ALGOR Inc., Pittsburgh, PA). Results for the slowest heating point of each product showed sufficiently good agreement between predicted and measured temperature profiles. The obtained Standard Error of the Estimate or RMSE (Root Mean Square Error) values, expressed in percentage, were less than 10.0%. The proposed approach based on reverse engineering principles and CAD/CAE data exchange technology can be used to optimize any thermal process of odd-shaped foods with respect to its temperature and time.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

ALDAYA, V. 1998. Elementos Finitos En Análisis Estructural. Available in [http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/presentaciones/cecalcula/ingenieria/introef\\_www\\_07\\_98/](http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/presentaciones/cecalcula/ingenieria/introef_www_07_98/) (Accessed at 12/05/2003)

ALGOR. 2003. ALGOR User's Guide. ALGOR, Inc.

ALFARO, W. V. 2003. Simulación de Procesos. Available in <http://www.monografias.com/trabajos6/sipro/sipro.shtml> (Accessed at 18/12/2003)

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). 1988. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Horwitz, H. (ed). Association of Officials Analytical Chemist, Washington. 1018 p.

BARREIRO, J.; LABARGA, J.; RIOS, J.; VIZÁN, A. 1999. Modelo para el Intercambio de Información en la Inspección Automática de Piezas. Universidad de León, Universidad Politécnica de Madrid, España. Available in: [http://taylor.unileon.es/investigacion/publicaciones/cidim\\_99\\_cicyt.pdf](http://taylor.unileon.es/investigacion/publicaciones/cidim_99_cicyt.pdf) (Accessed at 21/08/2003).

- BARTON, M. y RAJAN, S. D. 2000. Finite Element Primer for Engineers. Term paper for the author's graduate course in the FEM, CEE598, ASU, Fall.
- BATHE, K-J. 1996. Finite Element Procedures. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA. 1037 p.
- 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 Foods. Applied Science Publishers Ltd. London, England. pp. 43-54.
- BORDEGONI, M. y FILIPPI, S. 2001. Reverse Engineering for Molding. Available in <http://www.kaemart.it/html/publications.php> (Accessed at 14/11/2003)
- BOWER A. F. 1999. EN175: Advanced Mechanics of Solids. Brown University, Division of Engineering. Brown University Online Courses. Providence, Rhode Island. USA. Available in : <http://www.engin.brown.edu/courses/en175/Elasticity1/Elasticity1.htm> (Accessed at 21/08/2003)
- BUDGEELL, P. 1998. Finite Element Analysis and Optimization Introduction. Available in: [http://ww3.sympatico.ca/peter\\_budgell/FEA\\_intro.html](http://ww3.sympatico.ca/peter_budgell/FEA_intro.html) (Accessed at 10/05/2003)

- 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.
- CAREY, G. F. 1997. Computational Grids: Generation, Adaptation, and Solution Strategies. Taylor & Francis. Bristol, PA, USA.
- CAESOFT. 2003. Herramientas de Mallado y Preparación de Modelos FEA con ALGOR©. Available in:  
<http://www.caesoft.es/productos/algor/mallado/mallado.htm>  
(Accesed at 10/05/2003).
- CARSLAW, H.S. y JAEGER, J.C. 1959. Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press. London, England.
- CHANG, S. y TOLEDO, R. 1998. Simultaneous Determination of Thermal Diffusivity and Heat Transfer Coefficient during Sterilization of Carrot Slices in a Packed Bed. J. Food Science 55(1):199-285.
- 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). Elsevier Applied Science Co., Inc. New York, USA. pp. 93-101.
- CLELAND, A.C. y EARLE, R.L. 1984. Assessment of Freezing Time Prediction Methods. J. Food Science 49:1034-1042.
- CODEX STAN. 2001. CODEX STANDARD FOR ASPARAGUS. CODEX STAN 225-2001. Available in:

[ftp://ftp.fao.org/codex/standard/en/CXS\\_225e.pdf](ftp://ftp.fao.org/codex/standard/en/CXS_225e.pdf) (Accessed at 15/11/2003).

DATTA, A. K., SUN, E. y SOLIS, A. 1995. Food Property Data and their Composition-based Prediction. Engineering Properties of Foods. Ed. M. A. Rao and S.S.H. Rizvi, Marcel Dekker. New York, USA.

\_\_\_\_\_. 1998. Computer-Aided Engineering in Food Process and Product Design. Food Technology 52(10):44-52.

DE LA CRUZ, L. M. 2002. Generación de Mallas Usando Mapeo Ortogonal y Algunas Aplicaciones. Available in:  
<http://uxmcc1.iimas.unam.mx/~lmd/Proyectos/gema/tesis/tesis.html>  
(Accessed at 28/05/2003)

DÍAZ, C. 2000. Análisis Teórico Experimental del Coeficiente Convectivo de Transferencia de Calor durante los Procesos de Hidrocalentamiento e Hidroenfriamiento de Alimentos. Tesis Lic. Ing. Alimentos Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias.

FOODDIGICAE LAB, 2003. Laboratorio de Digitalización 3D e Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento y Preservación de Alimentos. Available in: <http://agrarias.uach.cl/fooddigicaelab>  
(Accessed at 25/10/2003)

GALLARDO, M. A. 2004. Validación experimental de un software asistido por Internet para describir el proceso de escaldado/hidroenfriado en floretes de brócoli (*Brassica oleracea* L. var *italica*). Tesis Lic. Ing. Alimentos Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias.

- GEANKOPLIS, C. J. 1978. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Editorial Continental S.A. México D.F., México. 758 p.
- GUNDERSEN, G. y STEIHAUG T. 2002. Data Structures in Java for Matrix Computations. Department of Informatics, University of Bergen. Noruega. Available in:  
<http://www.iu.uib.no/forskningsgrupper/opt/forskning/papers/NIK2002.pdf> (Accessed at 17/09/2003)
- KARDESTUNCER, H. 1987. Finite Element Handbook, McGraw-Hill, New York, USA.
- LARA, R. 2003. Cálculo de Estructuras mediante el Empleo de Modelos de Elementos Finitos. Available in:  
<http://www.ceisp.com/symposium/pdf/Symposium%20CEI%20Cuenca/2a%20sesion/15Empleode.pdf> (Accessed at 19/04/2004)
- LENZ, M. K y LUND, D.B. 1973. Temperature Distributions during Heat/Hold Processing of Foods. J. Food Science 38:630-632.
- LEWIS, M.J. 1990. Physical Properties of Foods and Food Processing System. Ellis Horwood Ltd. New York, USA. 465 p.
- Li, L., SCHEMENAUER, N., PENG, X., ZENG, Y., GU, P. 2002. A Reverse Engineering System for Rapid Manufacturing of Complex Objects. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 18: 53-67.
- MAESMANS, G., HENDRICKX, M., DECORT, S., FRANSIS, A. y TOBBACK, P. 1992. Fluid-To-Particle Heat Transfer Coefficient Determination of

Heterogeneous Foods: A Review. J. Food Processing and Preservation.16:29-69.

MOHSENIN, N. N. 1980. Thermal Properties of Foods and Agricultural materials. Gordon and Breach Science Publishers, Inc. New York, USA.

MOLERO, B. 2001. El MEF en el Proceso de Diseño. Available in TECNOCAE: [http://www.protorapid.com/reportaje\\_mef.htm](http://www.protorapid.com/reportaje_mef.htm) (Accessed at 10/05/2003)

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.

MYERS, G. E. 1971. Analytical Methods in Conduction Heat Transfer. McGraw-Hill, Inc. New York, USA. 508 p.

NESVADBA, P., HOUSKA, M., WOLF, W., GEKAS, V., JARVIS, D., SADD, P.A., JOHNS, A.I. 2004. Database of Physical Properties of Agro-Food Materials. J. Food Engineering 61(4):497-503.

NICHOLAS, J. V. y WHITE, D. R. 1994. Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration. John Wiley & Sons. Chichester, England. 357 p.

OKOS, M. R. 1986. Physical and Chemical Properties of Foods. American Society of Agricultural Engineering (ASAE). St. Joseph. Michigan, USA.

OWEN, S. 2003. An Introduction to Unstructured Mesh Generation. Pre-Conference Short Course: Mesh Generation and Automated Simulation. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, U.S.A. Available in:  
[http://andrew.cmu.edu/user/sowen/usnccm03/short\\_course.html](http://andrew.cmu.edu/user/sowen/usnccm03/short_course.html)  
(Accessed at 21/08/2003)

ÖZISIK, M. N. 1977. Basic Heat Transfer. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. Tokio. 572 p.

\_\_\_\_\_. 1994. Finite Difference Methods in Heat Transfer. CRC Press, Inc. Boca Raton, FL, USA. 412 p.

PÉREZ, A. 2004. Geometría Descriptiva. Available in:  
<http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/texto/04-Marte.pdf>  
(Accessed at 30/10/2004)

PERRY, R. H., GREEN, D. W. y MALONEY, J. O. 1984. Perry's Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill. New York, USA.

PHAM, Q. T. 2002. Calculations of Food Processing Time and Heat Load During Food Refrigeration. AIRAH Conference, Darling Harbour, Sydney, Australia.

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.

- RAHMAN, S. 1996. Food Properties Handbook. CRC Press, Inc. Boca Raton, FL, USA.
- RAO, M. A. y RIZVI S. S. H. 1995. Engineering Properties of Foods. Marcel Dekker, Inc. New York, USA.
- RAZDAN, A., STEINBERG, B. y FARIN G. 1998. From Digitized Data to NURB Surface Meshes. In Proceedings of the International Conference of Rapid Prototyping and Manufacturing, pp 749-754, Beijing, China. Available in <http://prism.asu.edu/publications.html> (Accessed at 14/02/2004)
- RHINOCEROS. 2002. NURBS modeling for Windows. User's Guide Version 3.0. Robert McNeel & Associates. USA.
- SCHNEIDER, P.J. 1957. Conduction heat transfer. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, Massachusetts. 395 p.
- SEGERLIND, L. J. 1976. Applied Finite Element Analysis. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
- \_\_\_\_\_. 1984. Applied Finite Element Analysis. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
- SINGH, R. P. 1982. Thermal diffusivity in food processing. Food Technology 36(2): 86-91.
- \_\_\_\_\_. 1995. Food properties database. Versión 2.0 para Windows. CRC Press, Inc. Boca Ratón, FL, USA.

- SINGH, R. P. y HELDMAN, D. R. 1984. Introduction to Food Engineering. Academic Press. San Diego, CA, USA. 305 p.
- \_\_\_\_\_. 1993. Introduction to Food Engineering. Academic Press, Inc. San Diego, CA, USA . 499 p.
- SMITH, B., RINAUDOT G. R., REED L. A., and WRIGHT T. 1988. Initial Graphics Exchange Specification (IGES) Version 4.0. NBSIR 88-3813, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD.
- STEEL, R.G. y TORRIE, J.H. 1960. Principles and procedures of statistics. Mc Graw-Hill Book Co. Inc. New York, USA.
- STEINBERG, B., RAZDAN, A. y FARIN, G. 1998. Reverse Engineering Trimmed NURB Surfaces from Laser Scanned Data. In the Solid Freeform Fabrication Conference, pp 277-284, Austin, Texas. Available in <http://prism.asu.edu/publications.html> (Accessed at 14/02/2004)
- SWEAT, V.E. 1974. Experimental value of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. J. Food Science 39 : 1080-1083.
- TINGA, W. R. y NELSON, S. Q. 1973. Dielectric Properties of Materials for Microwave Processing. Tabulated J. Microwave Power 8(1): 24-65.
- TOLEDO, R. T. 1991. Fundamentals of Food process Engineering. Van Nostrand Reinhold. New York, USA. 602 p.
- 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 22/12/2003).

VÁRADY, T., MARTIN, R. R., COX, J. 1997. Reverse Engineering of Geometric Models – An Introduction. *Computer-Aided Design*. 29(4):255-269.

WATT, B. y MERRILL, A. 1975. *Composition of Foods. Agriculture Handbook N°8*. Unites States Department of Agriculture. 189 p.

WILSON, J. 2001. An Introduction to Rhino. *CADALYST Magazine*. Available in <http://cadence.advanstar.com/2001/1201/thirddimension1201.html> (Accessed at 14/04/2004)

ZHANG, Q. y CAVALIERI, R. P. 1991. Thermal Model for Steam Blanching of Green Beans and Determination of Surface Heat Transfer Coefficient. *Transactions 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

### Ejemplo de cálculo de composición proximal ponderada a partir del contenido de humedad

Se toma como ejemplo el contenido de **proteínas** del espárrago. Según WATT y MERRILL (1975) éste corresponde al 2.5% y la humedad es de un 91.7%. Se puede así determinar el porcentaje de sólidos por diferencia de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{\% Sólidos} &= 100 - \text{\% Humedad} \\ &= 100 - 91.7 \\ &= 8.3\% \text{ de sólidos en bibliografía.} \end{aligned}$$

De la misma forma y considerando un contenido de humedad medido por método gravimétrico de 93.6%, se determina el porcentaje de sólidos para los espárragos utilizados:

$$\begin{aligned} \text{\% Sólidos} &= 100 - \text{\% Humedad} \\ &= 100 - 93.6 \\ &= 6.4\% \text{ de sólidos en espárragos utilizados.} \end{aligned}$$

Tomando como base de cálculo 100 g de sólidos y un porcentaje de proteínas en bibliografía de 2.5%, se obtienen los gramos de proteínas en los sólidos:

$$\begin{array}{r} 8.3\% \text{ de sólidos} \quad \text{----} \quad 100 \text{ g de sólidos} \\ 2.5\% \text{ de proteína} \quad \text{----} \quad X \end{array}$$

X = 30.12 g de proteína en los sólidos.

Finalmente, ponderando para los espárragos utilizados:

$$\begin{array}{r} 6.4\% \text{ de sólidos} \quad \text{----} \quad 100 \text{ g de sólidos} \\ X \quad \text{----} \quad 30.12 \text{ g de proteína en los sólidos} \end{array}$$

**X = 1.93% de proteína ponderada.**

## ANEXO 2

## Propiedades del agua en función de la temperatura

Temperatura		Densidad ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	Coeficiente de expansión térmica volumétrica ( $\beta$ ) (x10 <sup>4</sup> )	Conductividad térmica (k) (W/m K)	Viscosidad absoluta ( $\mu$ ) (Pa s) (x10 <sup>6</sup> )	Número de Prandtl (Pr)
°C	K					
0	273,15	999,9	-0,7	0,558	1793,636	13,7
5	278,15	1000,0		0,568	1534,741	11,4
10	283,15	999,7	0,95	0,577	1296,439	9,5
15	288,15	999,1		0,587	1135,610	8,1
20	293,15	998,2	2,1	0,597	993,414	7,0
25	298,15	997,1		0,606	880,146	6,1
30	303,15	995,7	3,0	0,615	792,377	5,4
35	308,15	994,1		0,624	719,808	4,8
40	313,15	992,2	3,9	0,633	658,026	4,3
45	318,15	990,2		0,640	605,070	3,9
50	323,15	988,1	4,6	0,647	555,056	3,55
55	328,15	985,7		0,652	509,946	3,27
60	333,15	983,2	5,3	0,658	471,650	3,00
65	338,15	980,6		0,663	435,415	2,76
70	343,15	977,8	5,8	0,668	404,034	2,55
75	348,15	974,9		0,671	376,575	2,23
80	353,15	971,8	6,3	0,673	352,059	2,23
85	358,15	968,7		0,676	328,523	2,04
90	363,15	965,3	7,0	0,678	308,909	1,95
95	368,15	961,9		0,680	292,238	1,84
100	373,15	958,4	7,5	0,682	277,528	1,75

FUENTE: SINGH y HELDMAN (1993)

### ANEXO 3

#### Ejemplo de cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor

El siguiente ejemplo muestra el cálculo del coeficiente convectivo de la etapa de calentamiento para el espárrago N° 1.

Datos:

$T_0$  (temperatura inicial) = 20,4 °C

$T_{\infty}$  (temperatura del medio) = 94,2 °C

Área superficial del modelo 3D del espárrago = 0,0070597203 m<sup>2</sup>

$H$  (longitud del espárrago) = 0,17 m

$g$  (aceleración de gravedad) = 9,8 m/s<sup>2</sup>

La ecuación para el Número de Grashof es la siguiente:

$$Gr = \frac{g \Delta T D^3 \beta \rho^2}{\mu^2}$$

Cada parámetro de esta ecuación se calculó como sigue:

- $\Delta T$  se calculó de la siguiente forma:

$$\Delta T = |T_0 - T_{\infty}| = |20,4 - 94,2| = 73,8 \text{ °C}$$

- $D$  se calculó según el supuesto de que el área superficial de la geometría irregular del espárrago (dada por el modelo digital 3D) es equivalente al área superficial de un cilindro infinito de igual longitud:

$$\begin{aligned} A_{sup. \text{espárrago}} &\equiv A_{sup. \text{cilindro.inf.}} \\ &= 2 \pi r H \\ &= \pi D H \end{aligned}$$

$$\text{despejando } D = \frac{A_{sup. \text{espárrago}}}{\pi H} = \frac{0,0070597203 \text{ m}^2}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 0,17 \text{ m}}$$

$$D = 0,013225403 \text{ m}$$

- Los valores  $\beta$ ,  $\rho$  y  $\mu$  se obtuvieron de la tabla de propiedades del agua del ANEXO 2 en función de la temperatura de película o *film*:

$$\boxed{T_{film} = \frac{T_0 + T_\infty}{2}} = \frac{20,4 \text{ }^\circ\text{C} + 94,2 \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 57,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Interpolando este resultado en la tabla, se obtuvieron los siguientes valores:

$$\beta = 0,0005111 \text{ [1/K]}$$

$$\rho = 984,55 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\mu = 0,00049233 \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$$

En consecuencia, el Número de Grashof queda como sigue:

$$\boxed{Gr = \frac{g \Delta T D^3 \beta \rho^2}{\mu^2}} = \frac{9,8 \cdot 73,8 \cdot 0,013225403^3 \cdot 0,0005111 \cdot 984,55^2}{0,00049233^2}$$

$$Gr = 3419623,793$$

- Luego de obtenido el Número de Grashof, se obtiene el valor del Número de Prandtl por interpolación con la temperatura de film en la tabla de propiedades del agua del ANEXO 2:

$$Pr = 3,1458$$

- Teniendo los números adimensionales de Grashof y Prandtl, se obtiene el Número de Nusselt reemplazando en la ecuación 2.26 de DÍAZ (2000) para el caso de calentamiento de cilindros bajo régimen de convección natural:

$$\boxed{Nu = 0,5512 (Gr Pr)^{0,2421}} = 0,5512 (3419623,793 \cdot 3,1458)^{0,2421}$$

$$Nu = 27,77704637$$

- Finalmente, interpolando con la temperatura de film en la tabla de propiedades del agua del ANEXO 2, obtenemos la conductividad térmica:

$$k = 0,65476 \text{ W/m K}$$

- y despejamos h de la ecuación 2.19, quedando:

$$\boxed{h = \frac{Nu \cdot k}{D}} = \frac{27,77704637 \cdot 0,65476}{0,013225403}$$

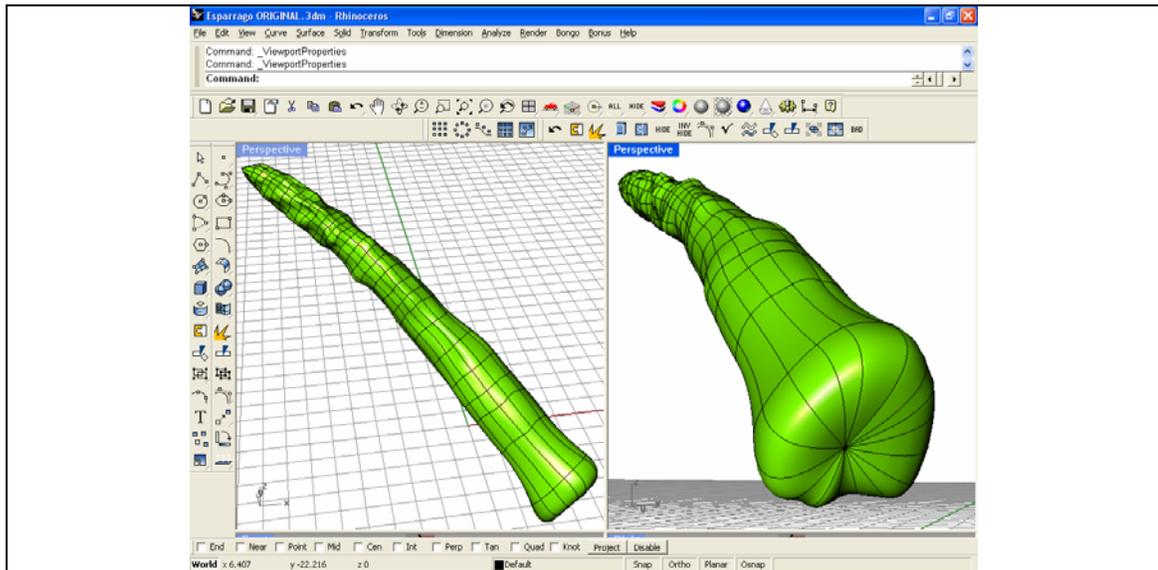
$$h = 1375,179148 \text{ W/m}^2\text{K}$$

## ANEXO 4

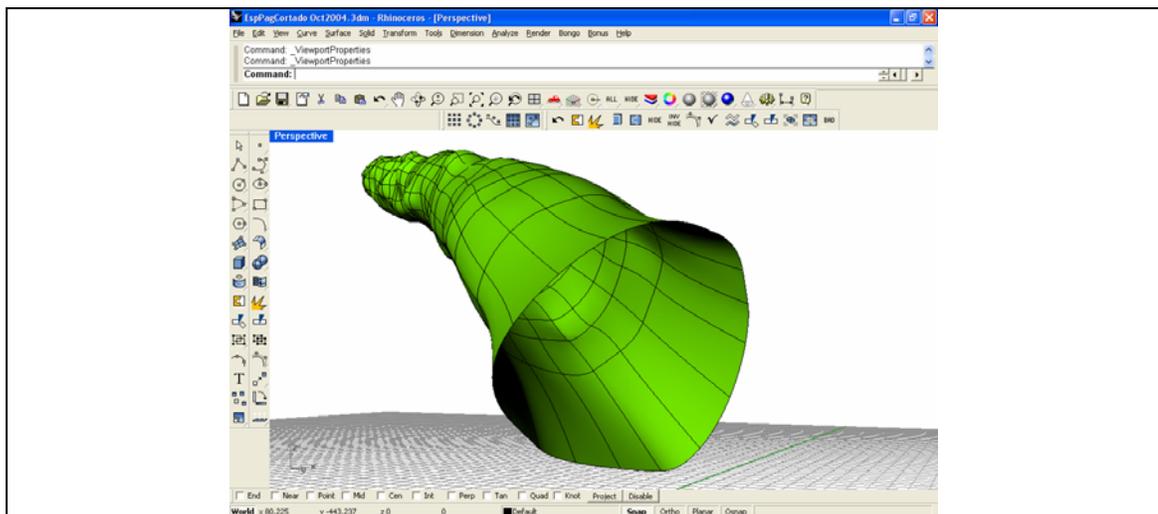
### Detalle del proceso de modelación 3D de los alimentos utilizados

#### ANEXO 4.1 Modelación de turiones de espárrago.

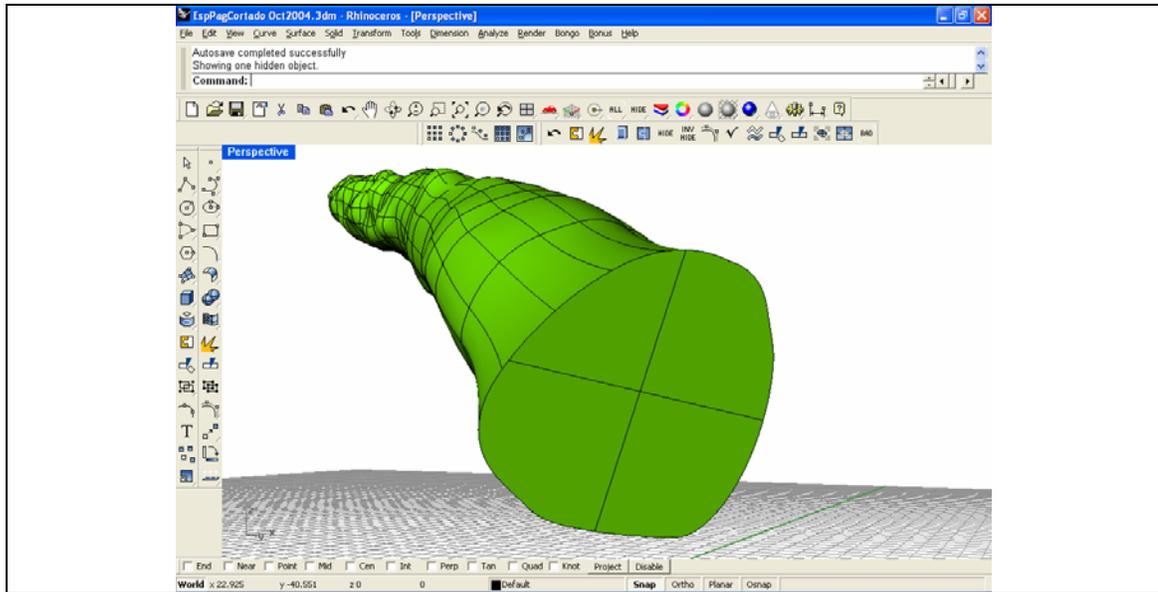
En la siguiente figura se observa un modelo resultante de la digitalización de un turión de espárrago. Se puede ver que en el extremo inferior, donde se realizó el corte con cuchilla, presenta una curvatura en su superficie. Esto es debido a la interpolación de las curvas NURBS:



Esta curvatura es sobrante para el modelo, por lo que fue necesario realizar un pequeño corte en la parte inferior para simular el corte con cuchilla, cuidando de eliminar el menor volumen posible:

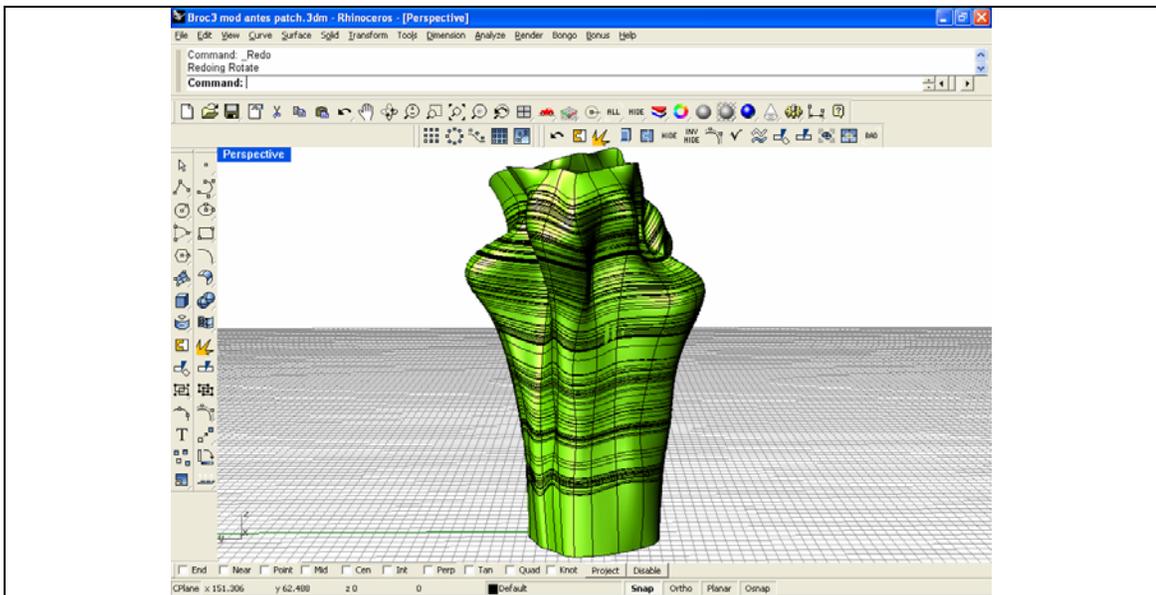


El corte realizado hizo que resultara una superficie abierta, y para realizar una simulación se necesita un sólido 3D, es decir, una superficie cerrada, por lo que, finalmente, tuvo que agregarse una superficie que cerrara el modelo:

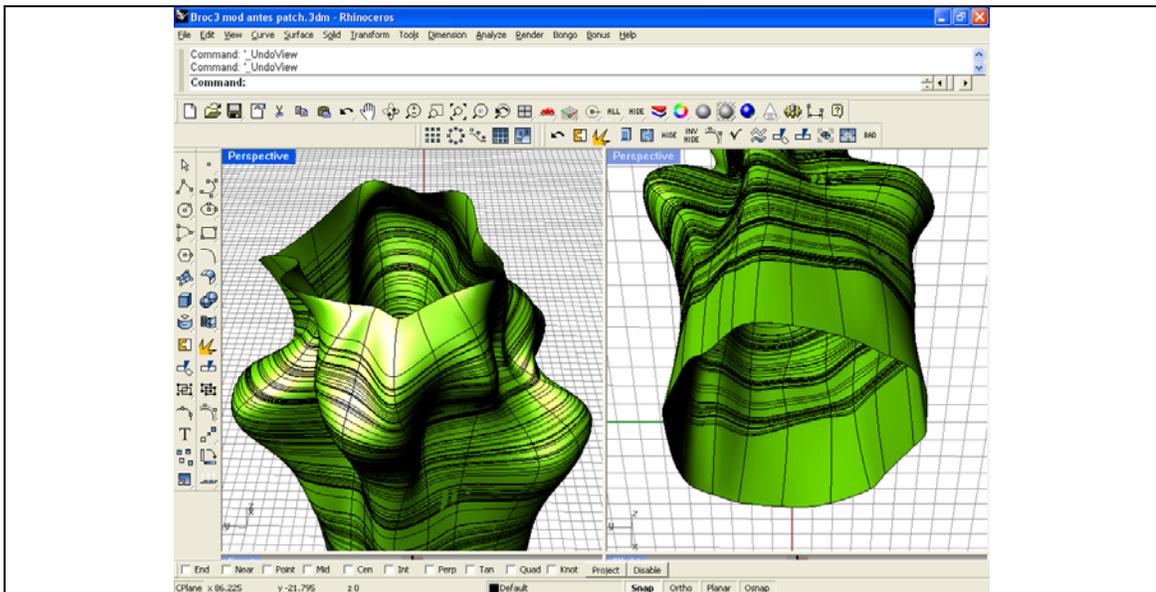


## ANEXO 4.2 Modelación de floretes de brócoli

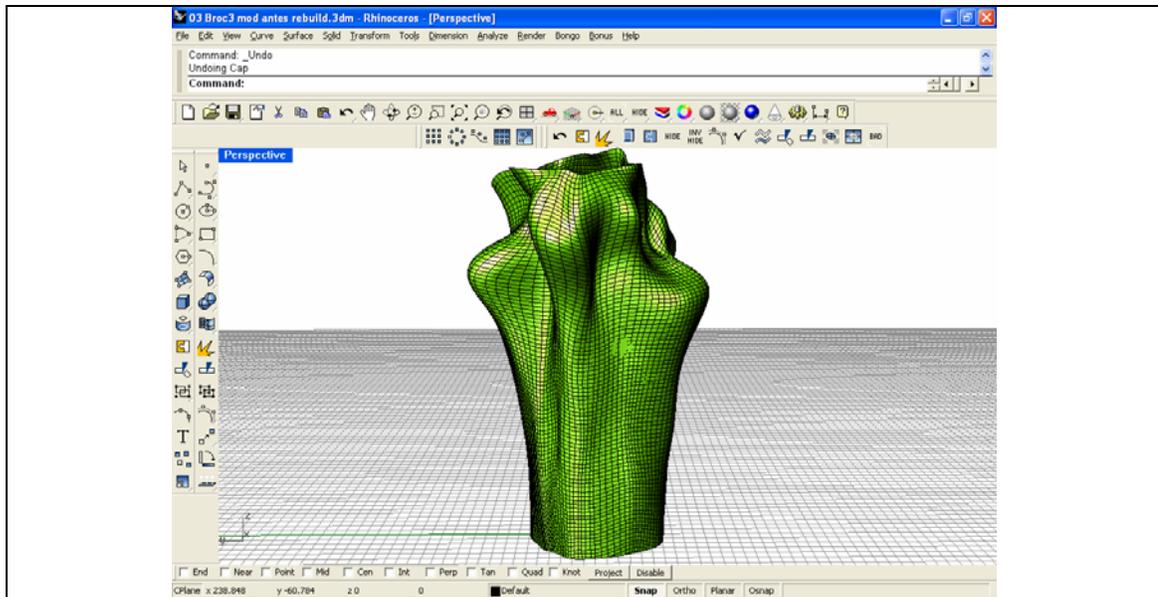
En la siguiente figura se puede ver un modelo obtenido por digitalización 3D de un tallo de florete de brócoli:



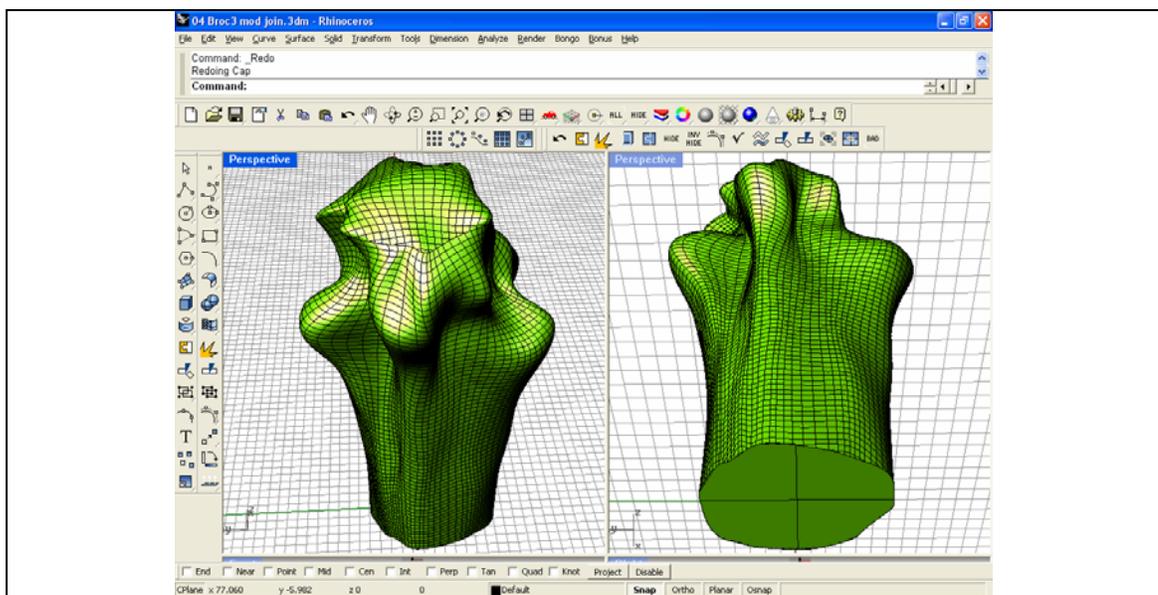
En este caso la digitalización genera una superficie abierta arriba y abajo:



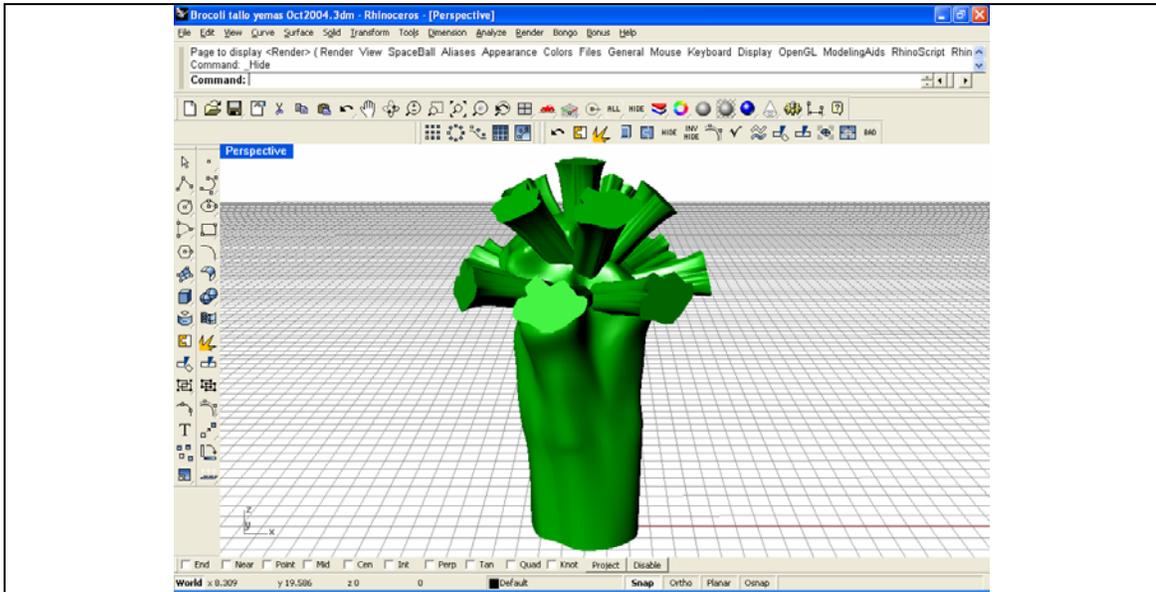
También puede observarse que las isocurvas y puntos de control se encuentran dispuestos de forma desordenada. Es por esto que se usó la función “reconstruir superficie” para reordenar y aumentar el número de puntos de control:



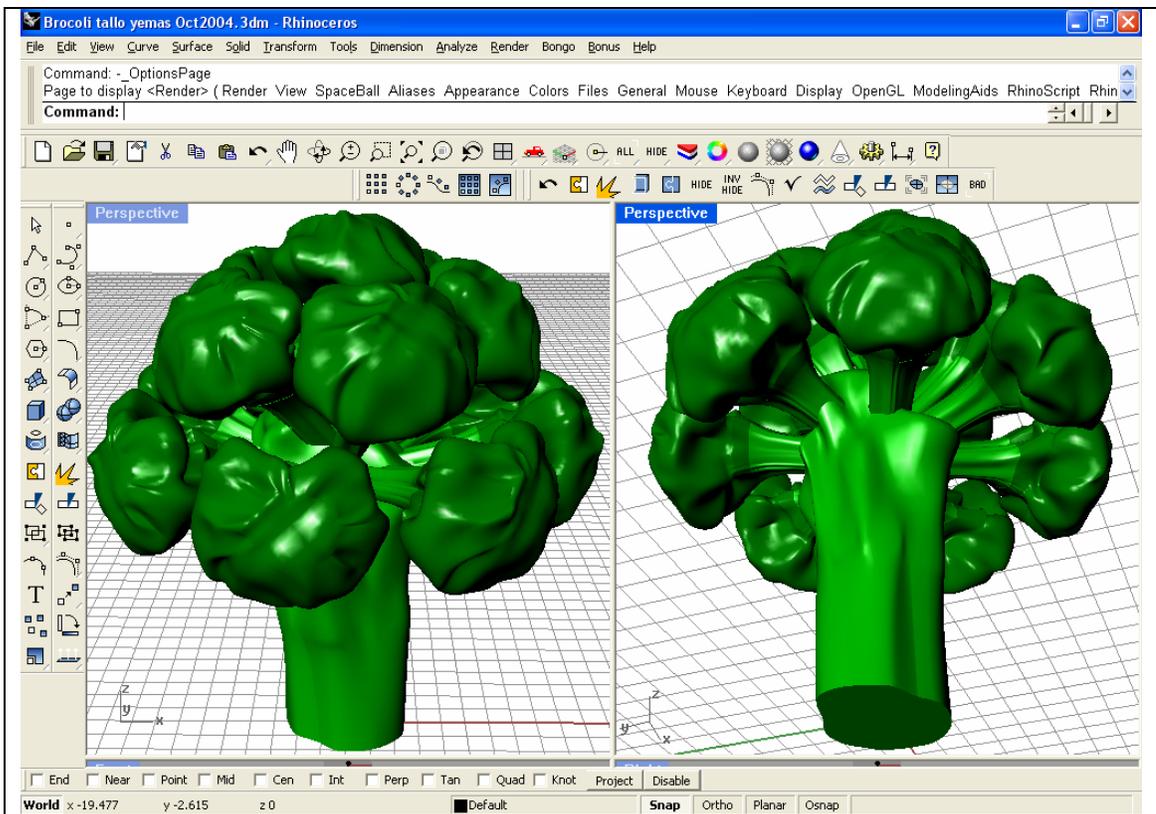
Esta superficie aún no presenta ninguna utilidad para realizar una simulación, pues no es un sólido. Un sólido 3D es una superficie cerrada, por lo tanto, tuvieron que agregarse superficies que cerraran el modelo tanto arriba como abajo:



Luego, por medio de uniones *booleanas* (fusión de dos o más sólidos en uno y eliminación de las partes interiores), al modelo del tallo se le agregaron pedúnculos:

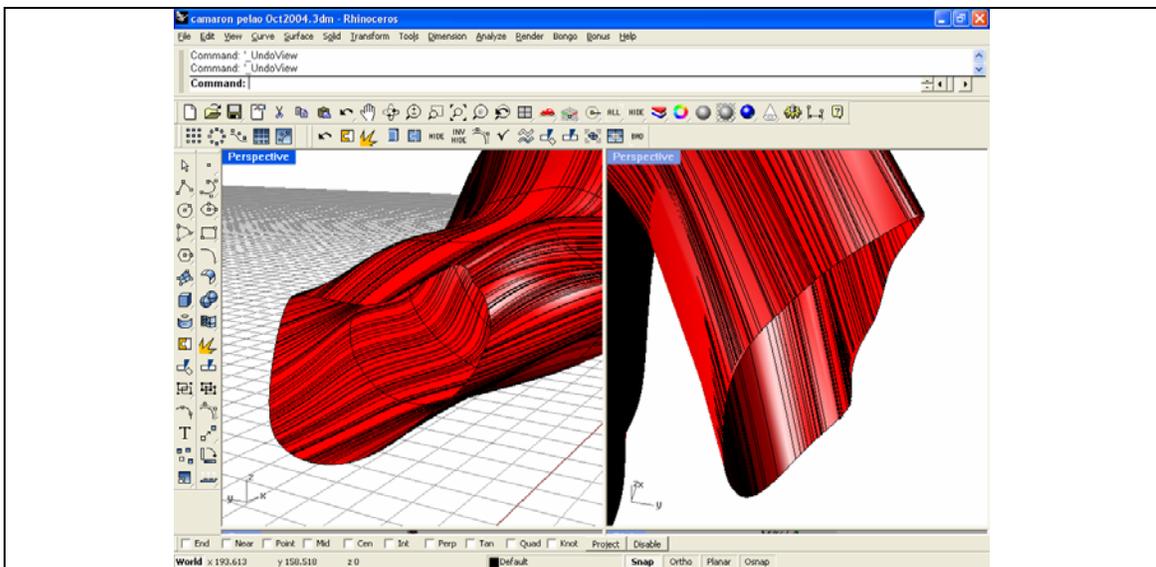
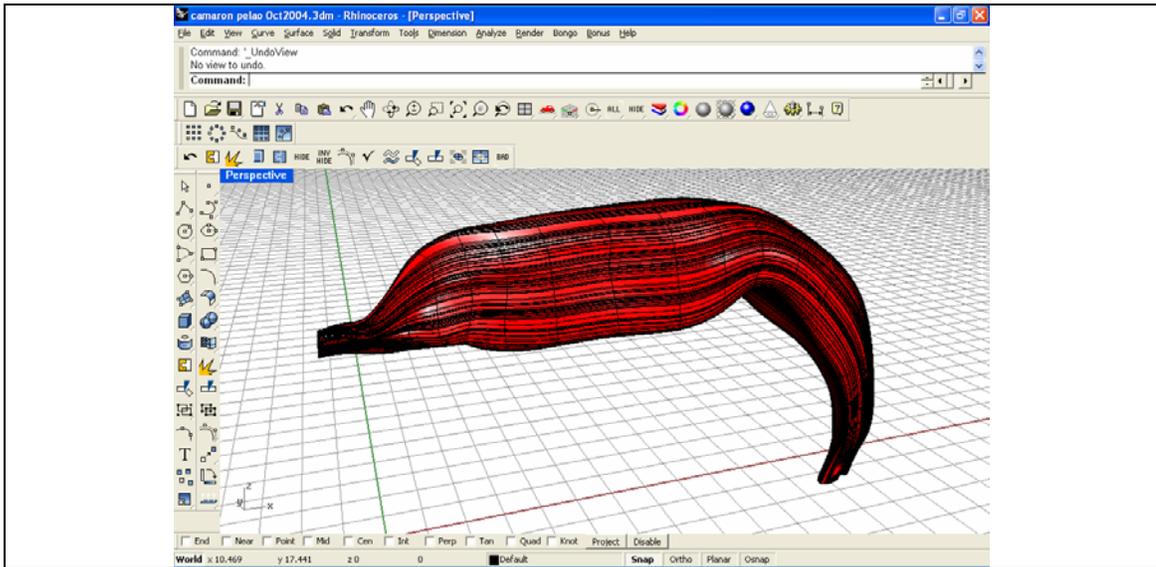


y, finalmente, yemas florales:

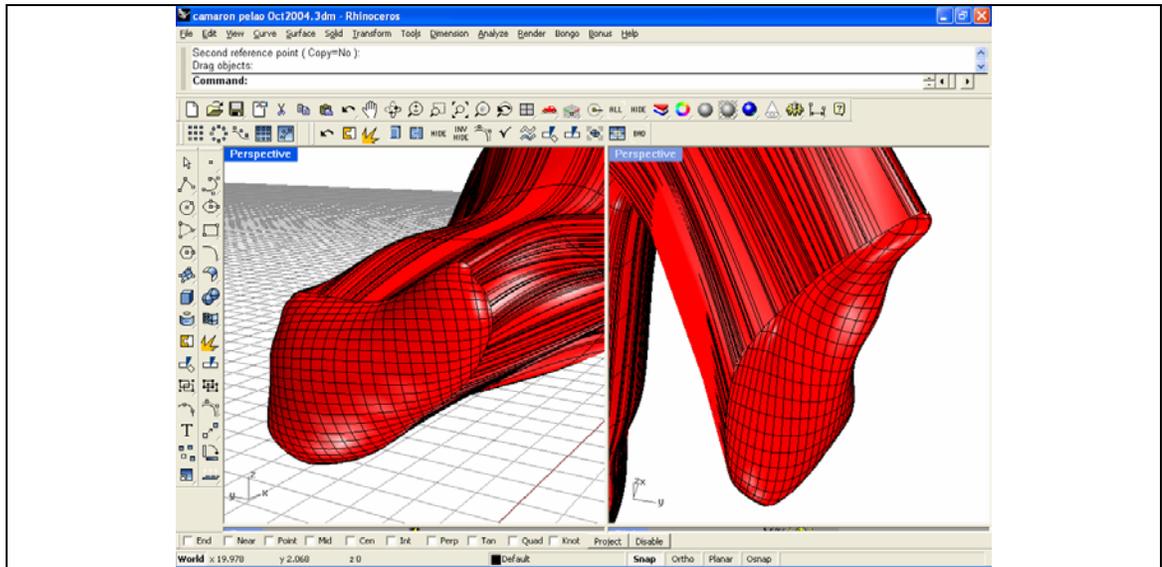


### ANEXO 4.3 Modelación de camarones

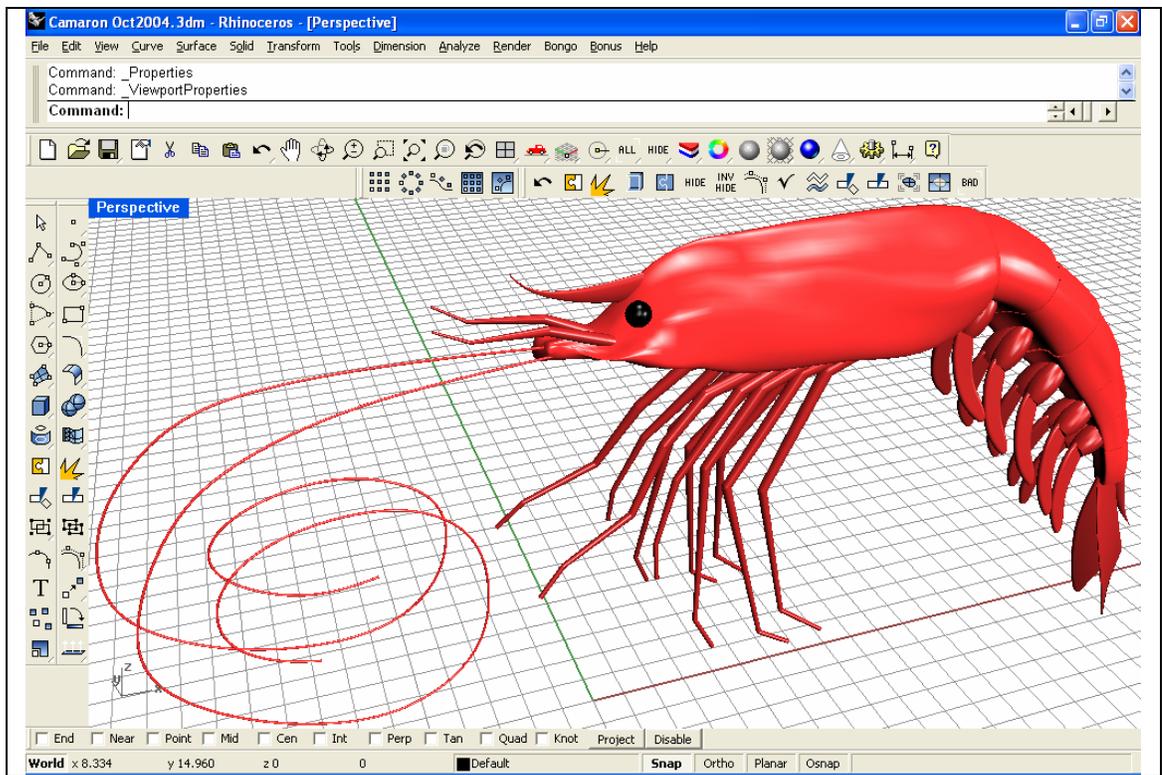
Al igual que el tallo del florete de brócoli, el modelo obtenido para el caso del camarón fue una superficie abierta en los extremos de la cabeza y la cola:



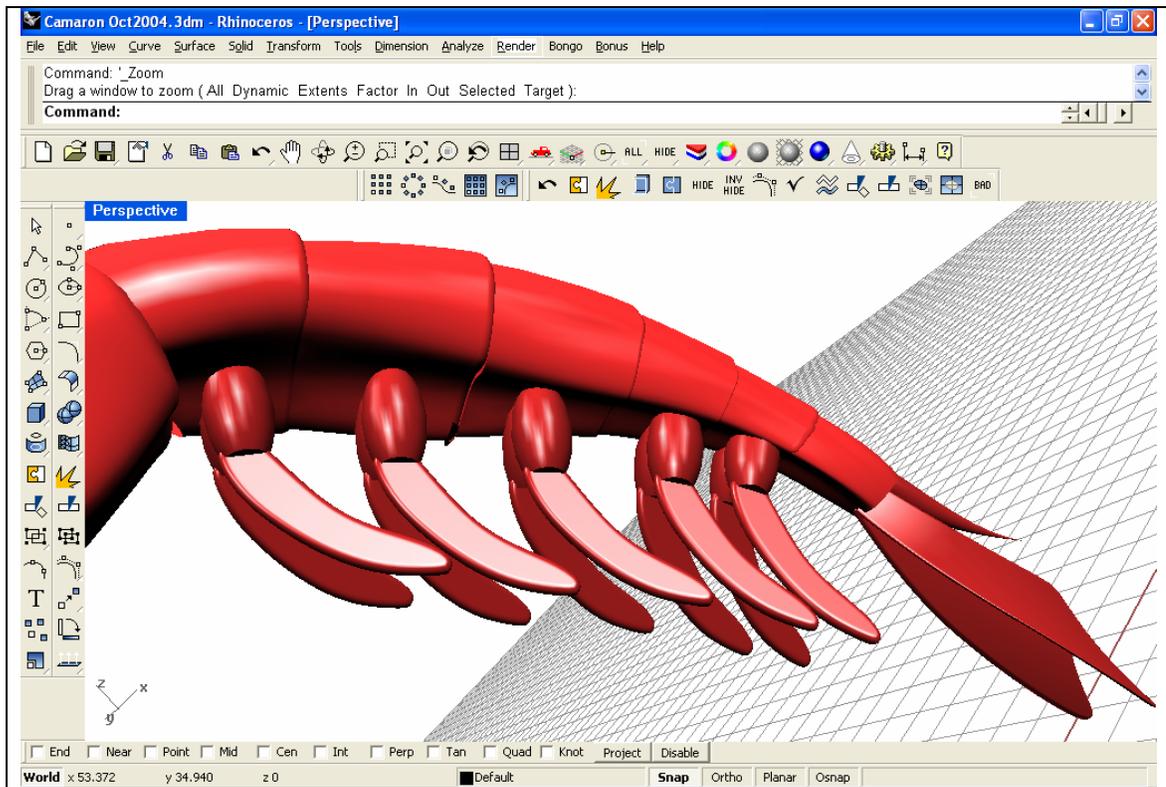
Para que el modelo sea un sólido 3D, es decir una superficie cerrada, se debieron crear pequeñas superficies que taparan estos agujeros:



Finalmente, y con fines estéticos, se agregaron detalles como patas y antenas para darle una apariencia más cercana a la realidad:



En la siguiente imagen se puede ver en detalle el abdomen o cola:



## ANEXO 5

## Parámetros de caracterización de los alimentos evaluados.

<i>Alimento</i>	<i>Nº</i>	<i>D</i> ( <i>m</i> )	<i>V geom irr*</i> ( <i>m</i> <sup>3</sup> )	<i>As geom irr*</i> ( <i>m</i> <sup>2</sup> )	<i>V/As</i> ( <i>m</i> )	<i>H (altura)</i> ( <i>m</i> )
<i>Espárrago</i>	1	0,0132254	2,09E-05	7,06E-03	2.97E-03	0,17
	2	0,01268469	2,03E-05	6,77E-03	3.00E-03	0,17
	6	0,01341379	2,24E-05	7,16E-03	3.13E-03	0,17
<i>Brócoli</i>	2	0,06104775	2,07E-05	1,17E-02	1.77E-03	0,05
	3	0,06058095	2,04E-05	1,15E-02	1.77E-03	0,05
	4	0,05736666	1,72E-05	1,03E-02	1.67E-03	0,05
<i>Camarón</i>	1	0,0147412	2,33E-05	6,94E-03	3.35E-03	0,15
	2	0,01474429	1,98E-05	6,02E-03	3.28E-03	0,13
	3	0,01193436	1,47E-05	4,87E-03	3.01E-03	0,13

\* dado por el software Rhinoceros© 3.0.

## ANEXO 6

**Parámetros para la estimación del coeficiente convectivo h para cada caso evaluado.**

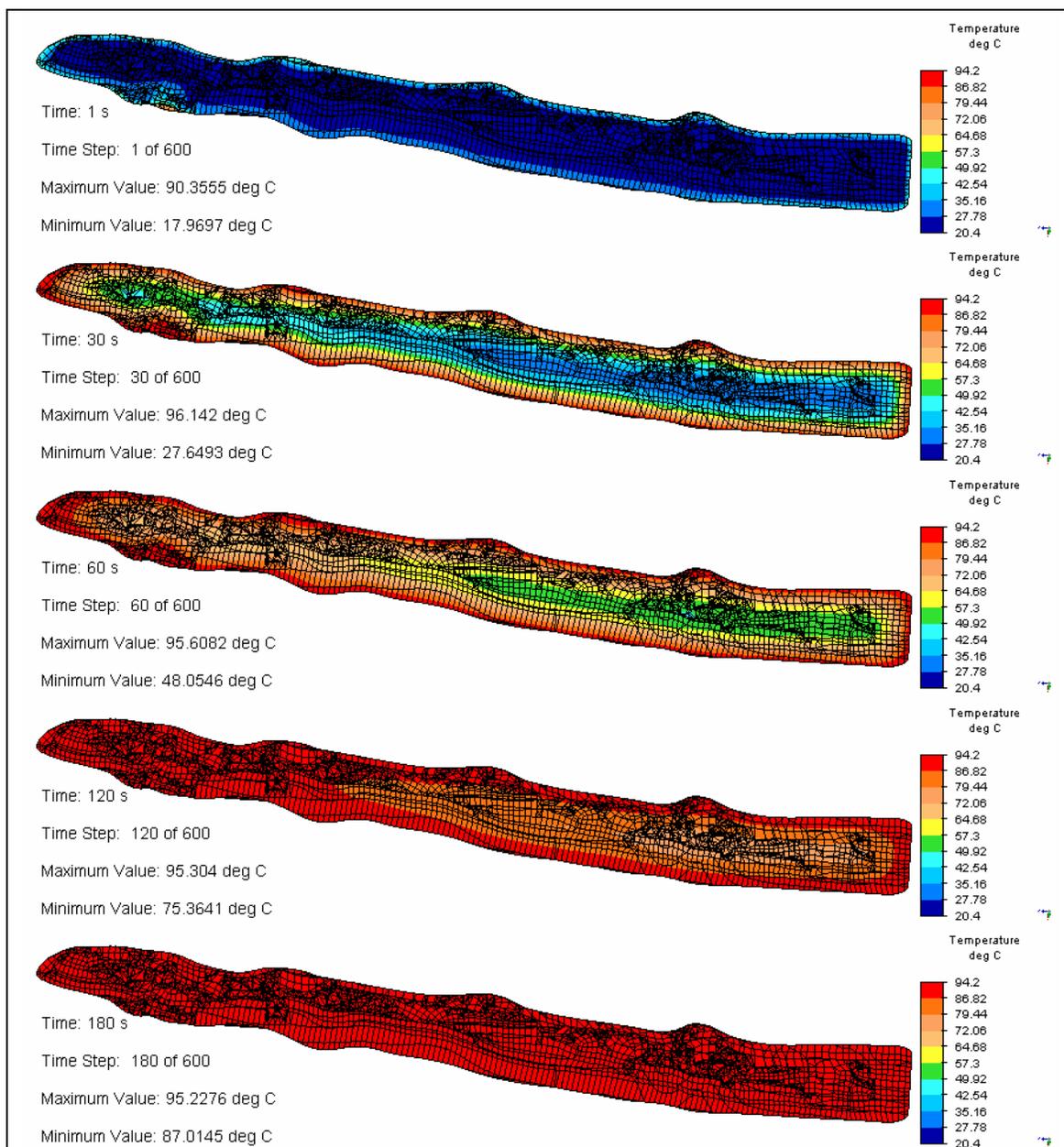
<i>Alimento</i>	<i>Etapas</i>	<i>Nº</i>	<i>T<sub>o</sub></i> (°C)	<i>T<sub>m</sub></i> (°C)	<i>ΔT</i> (°C)	<i>T<sub>film</sub></i> (°C)	<i>β</i> (1/K)	<i>μ</i> (Pa·s)	<i>ρ</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>k</i> (W/mK)	<i>Pr</i>	<i>Gr</i>	<i>Nu</i>	<i>h</i> (W/m <sup>2</sup> K)
Espárrago	Calentamiento	1	20,4	94,2	73,8	57,3	0,0005111	0,00049233	984,55	0,65476	3,1458	3419623,79	27,7770464	1375,17915
		2	20,1	94,2	74,1	57,15	0,00051005	0,00049348	984,625	0,65458	3,1539	3009552,77	26,9479427	1390,61953
		6	19,9	94,2	74,3	57,05	0,00050935	0,00049424	984,675	0,65446	3,1593	3552934,45	28,0645006	1369,26988
	Enfriamiento	1	20,4	3,7	16,7	12,05	0,00011858	0,0012305	999,454	0,5811	8,926	29615,9365	7,8130702	343,291995
		2	20,1	3,7	16,4	11,9	0,00011685	0,00123532	999,472	0,5808	8,968	25091,015	7,47531263	342,275604
		6	19,9	3,7	16,2	11,8	0,0001157	0,00123854	999,484	0,5806	8,996	28870,8641	7,77529703	336,544619
Brócoli	Calentamiento	2	18,1	93	74,9	55,55	0,00049885	0,00050573	985,425	0,65266	3,2403	316293822	75,7066569	809,377988
		3	17,9	93	75,1	55,45	0,00049815	0,0005065	985,475	0,65254	3,2457	308579954	75,3973525	812,133056
		4	17,9	93	75,1	55,45	0,00049815	0,0005065	985,475	0,65254	3,2457	262022239	73,2364089	833,056872
	Enfriamiento	2	18,1	2,3	15,8	10,2	0,0000973	0,00129001	999,676	0,5774	9,444	2058449,47	28,5118686	269,670093
		3	17,9	2,3	15,6	10,1	0,00009615	0,00129322	999,688	0,5772	9,472	1952947,69	28,1977709	268,661264
		4	17,9	2,3	15,6	10,1	0,00009615	0,00129322	999,688	0,5772	9,472	1658292,19	27,1874255	273,54884
Camarón	Calentamiento	1	19,2	94,3	75,1	56,75	0,00050725	0,00049654	984,825	0,6541	3,1755	4704265,28	30,0751767	1334,50307
		2	19,5	94,3	74,8	56,9	0,0005083	0,00049539	984,75	0,65428	3,1674	4719222,7	30,0796948	1334,79105
		3	15,1	93,8	78,7	54,45	0,00049115	0,00051491	985,964	0,65145	3,3008	2360886,56	25,6914376	1402,39492
	Enfriamiento	1	19,2	3,5	15,7	11,35	0,00011053	0,00125302	999,538	0,5797	9,122	34663,3472	8,20646818	322,720704
		2	19,5	3,5	16	11,5	0,00011225	0,00124819	999,52	0,58	9,08	36176,3821	8,29270218	326,212259
		3	15,1	3,3	11,8	9,2	0,0000858	0,00132217	999,796	0,5754	9,724	9643,61761	5,87976547	283,485399

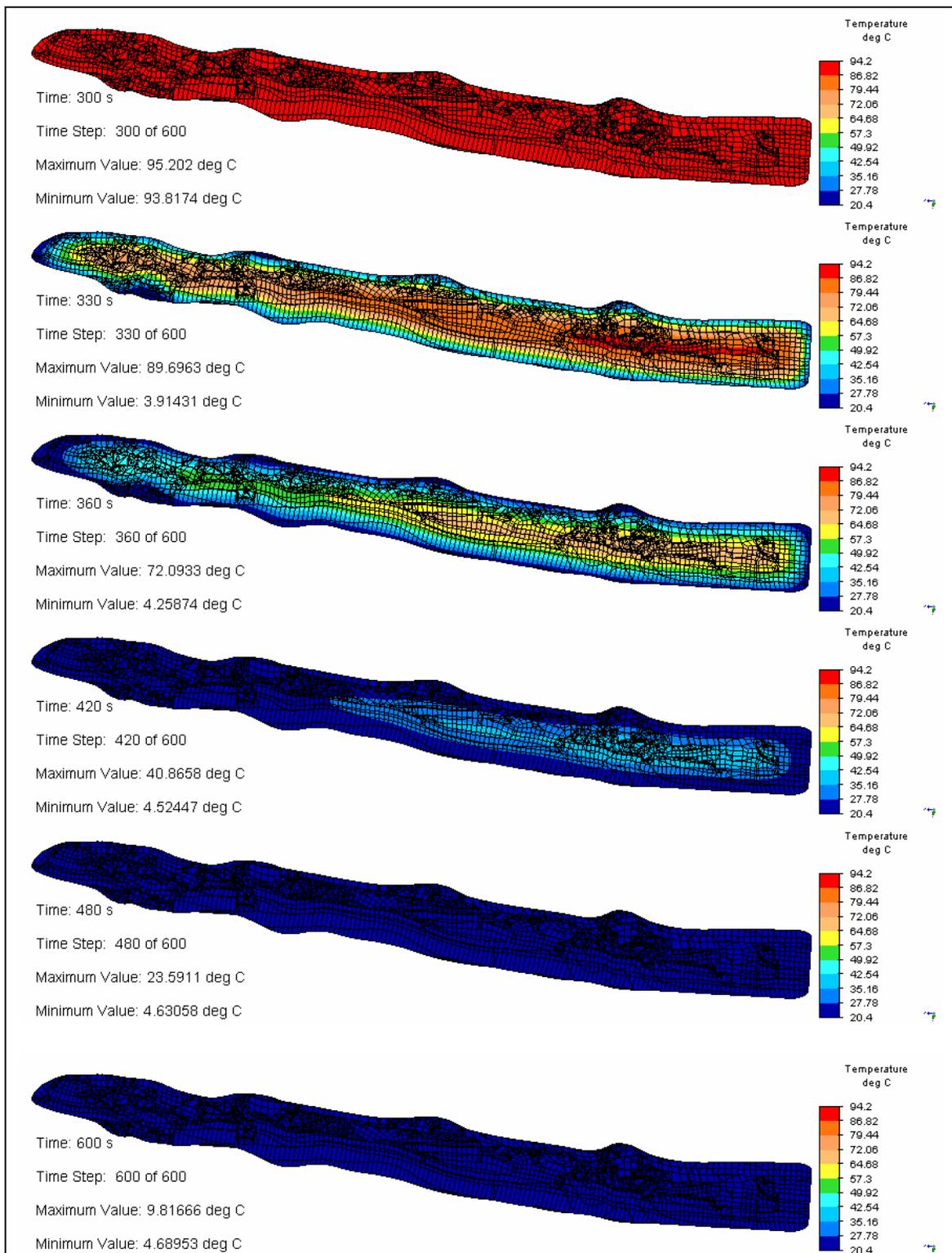
## ANEXO 7

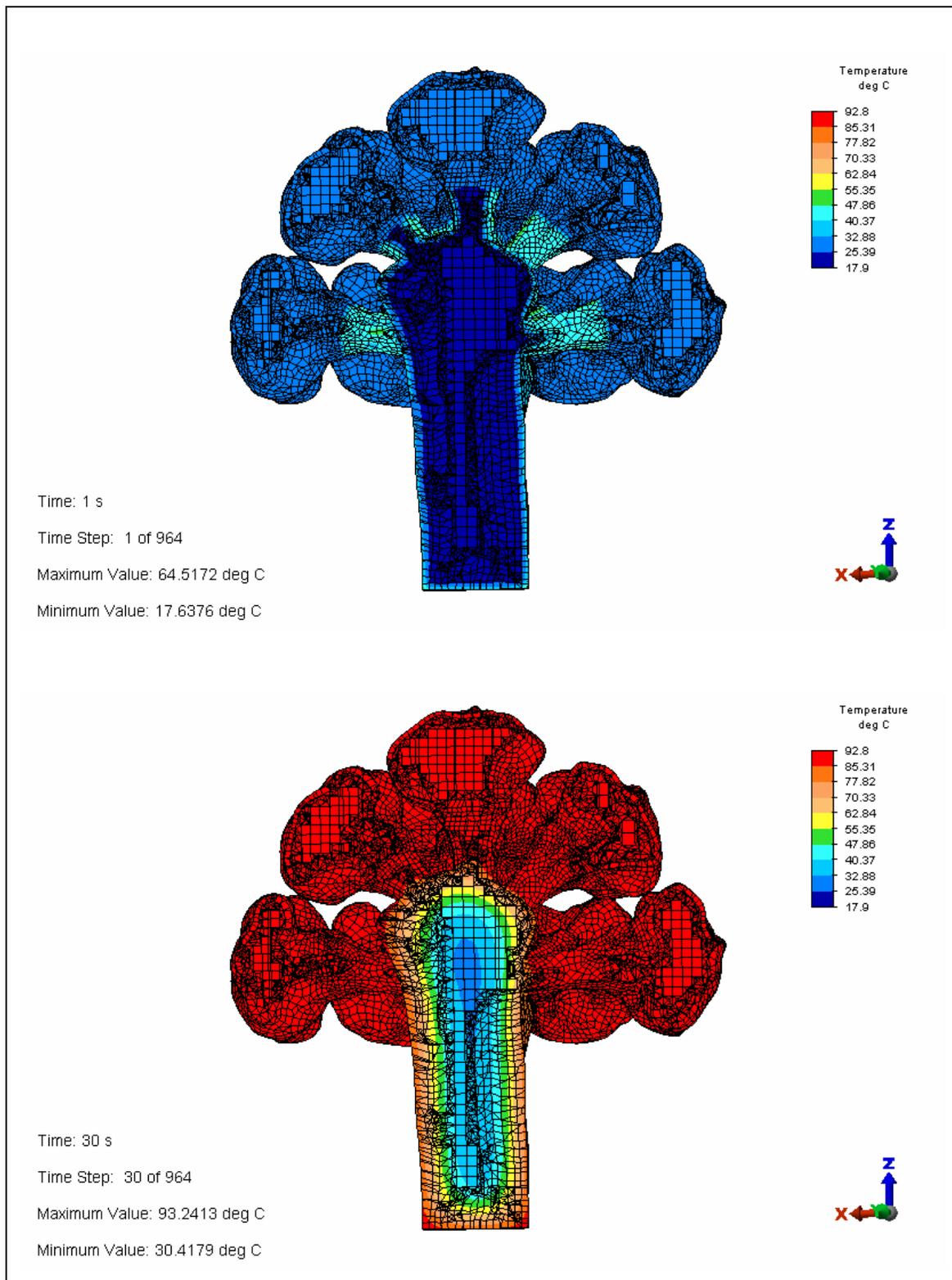
### Diagramas de contorno de cada alimento de los tratamientos simulados en ALGOR©.

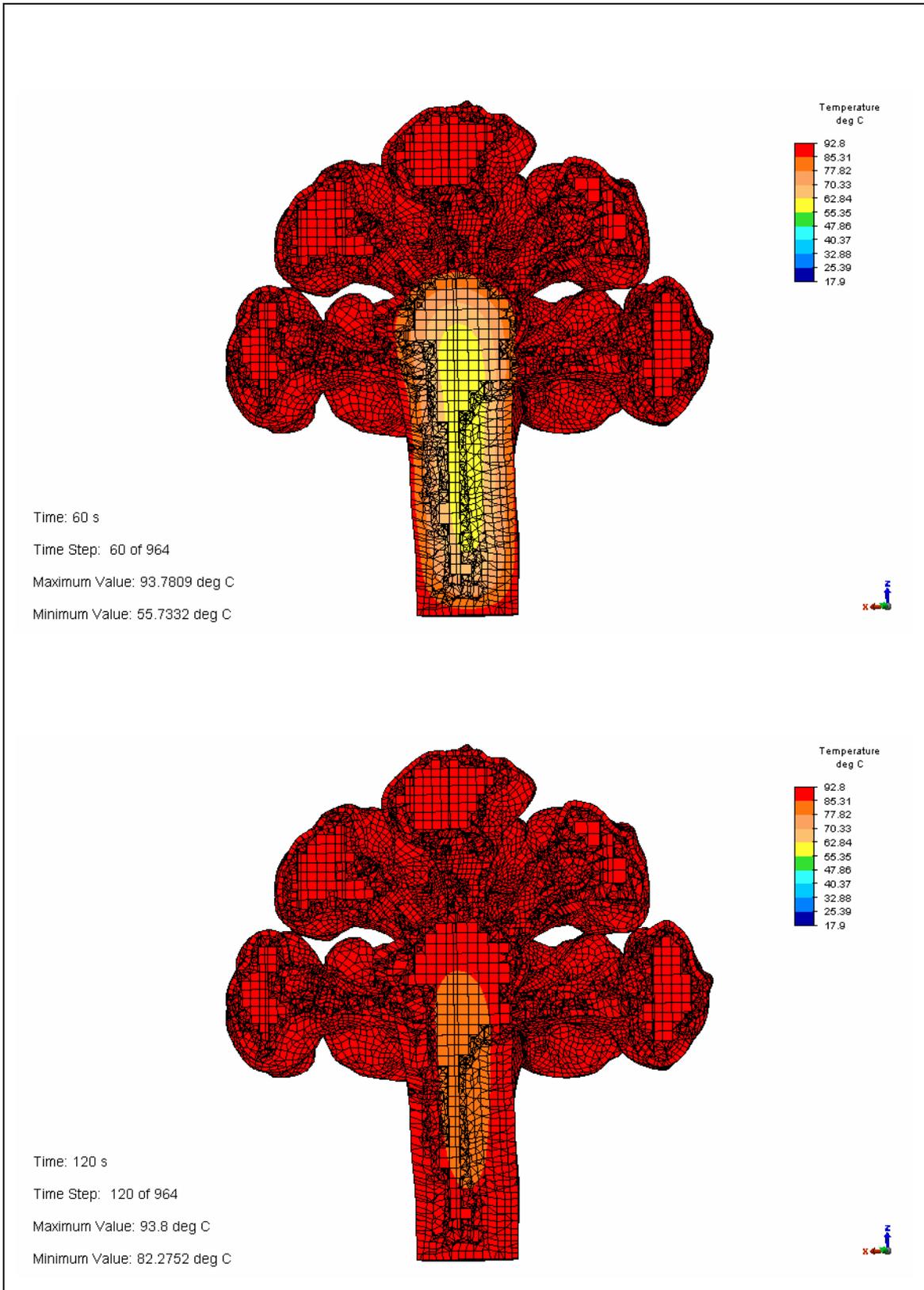
Las siguientes imágenes muestran diagramas de contorno en ALGOR© a diversos intervalos para uno de cada alimento evaluado.

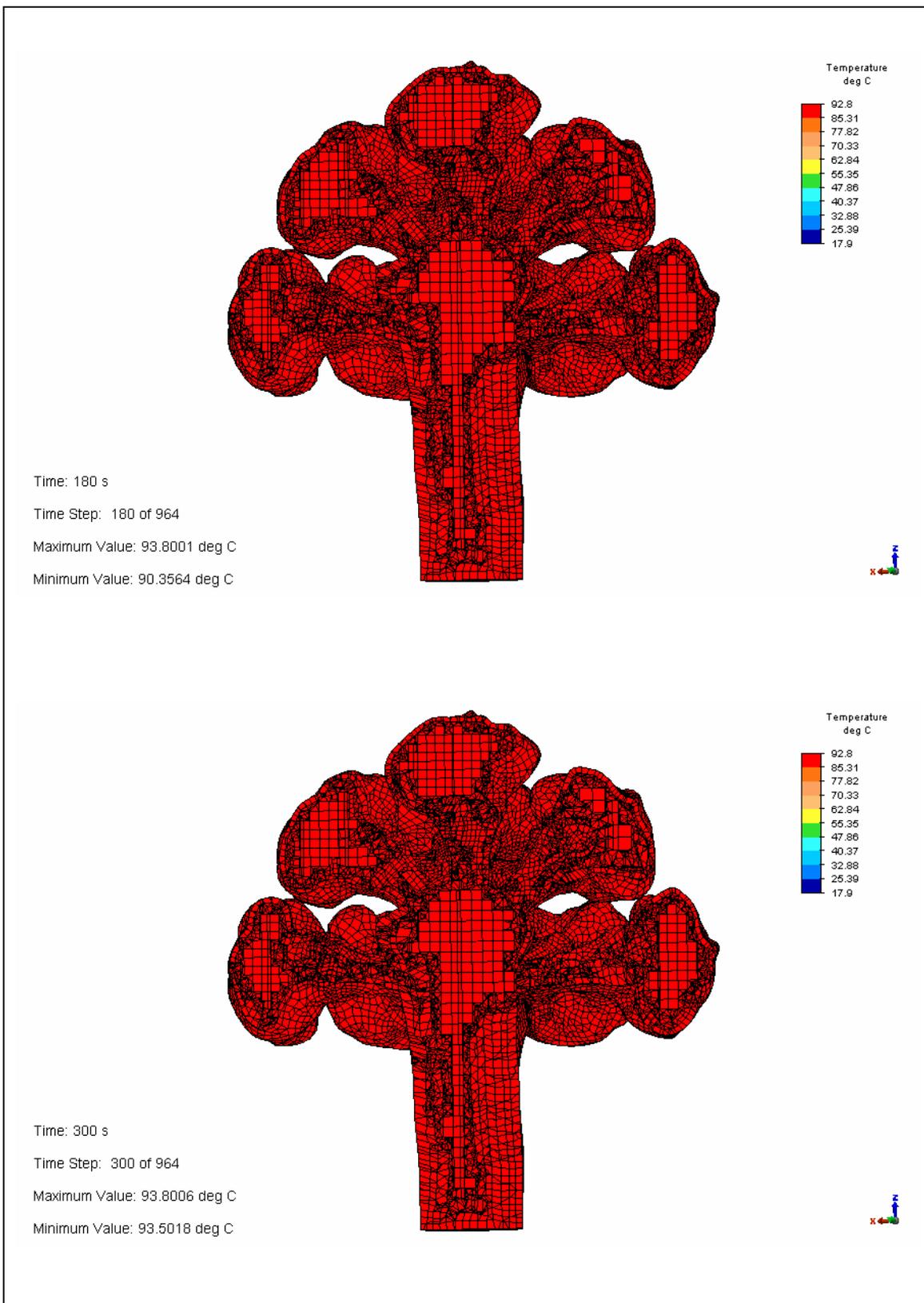
#### ANEXO 7.1 Diagramas de contorno del espárrago 1.

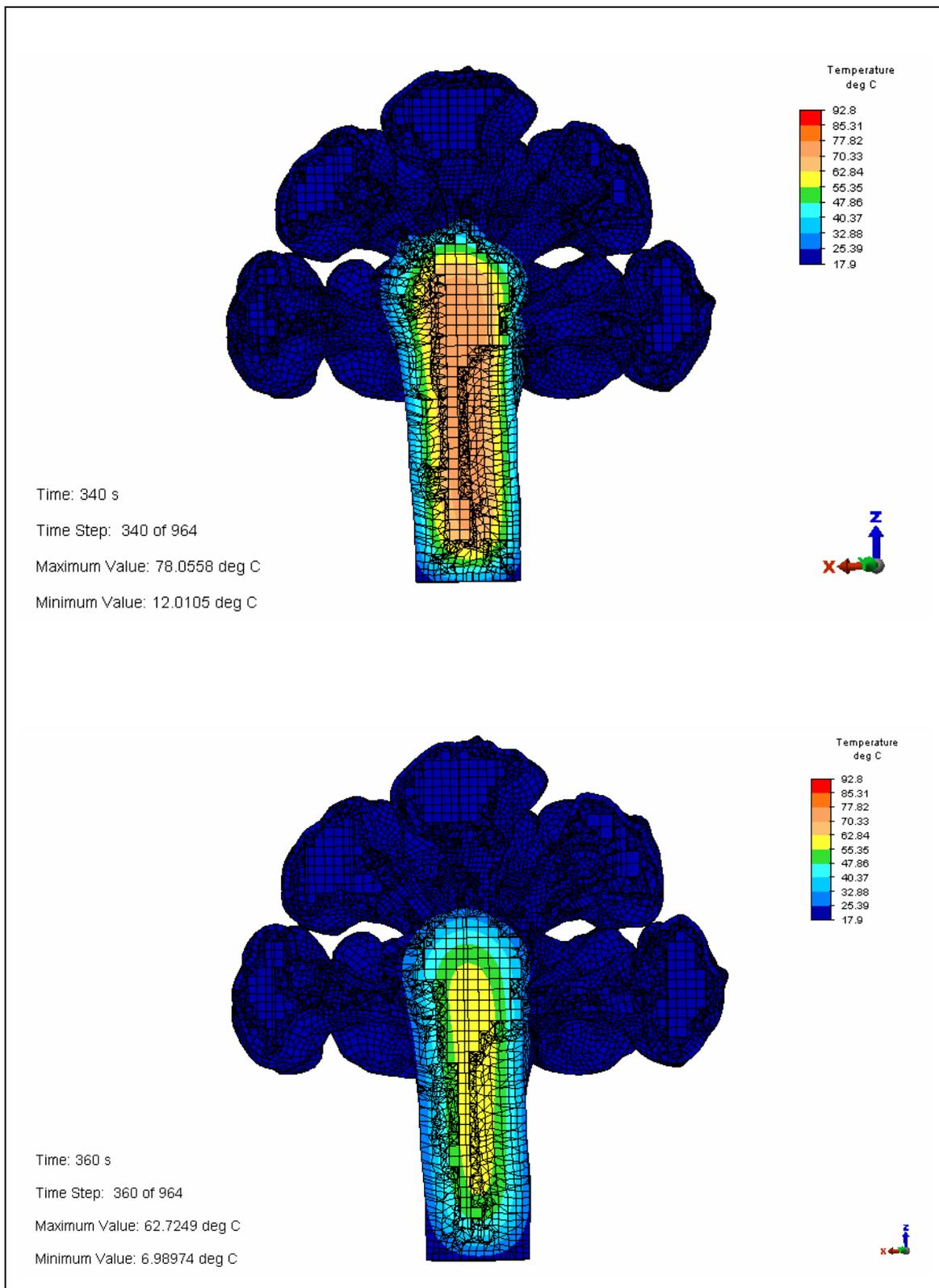


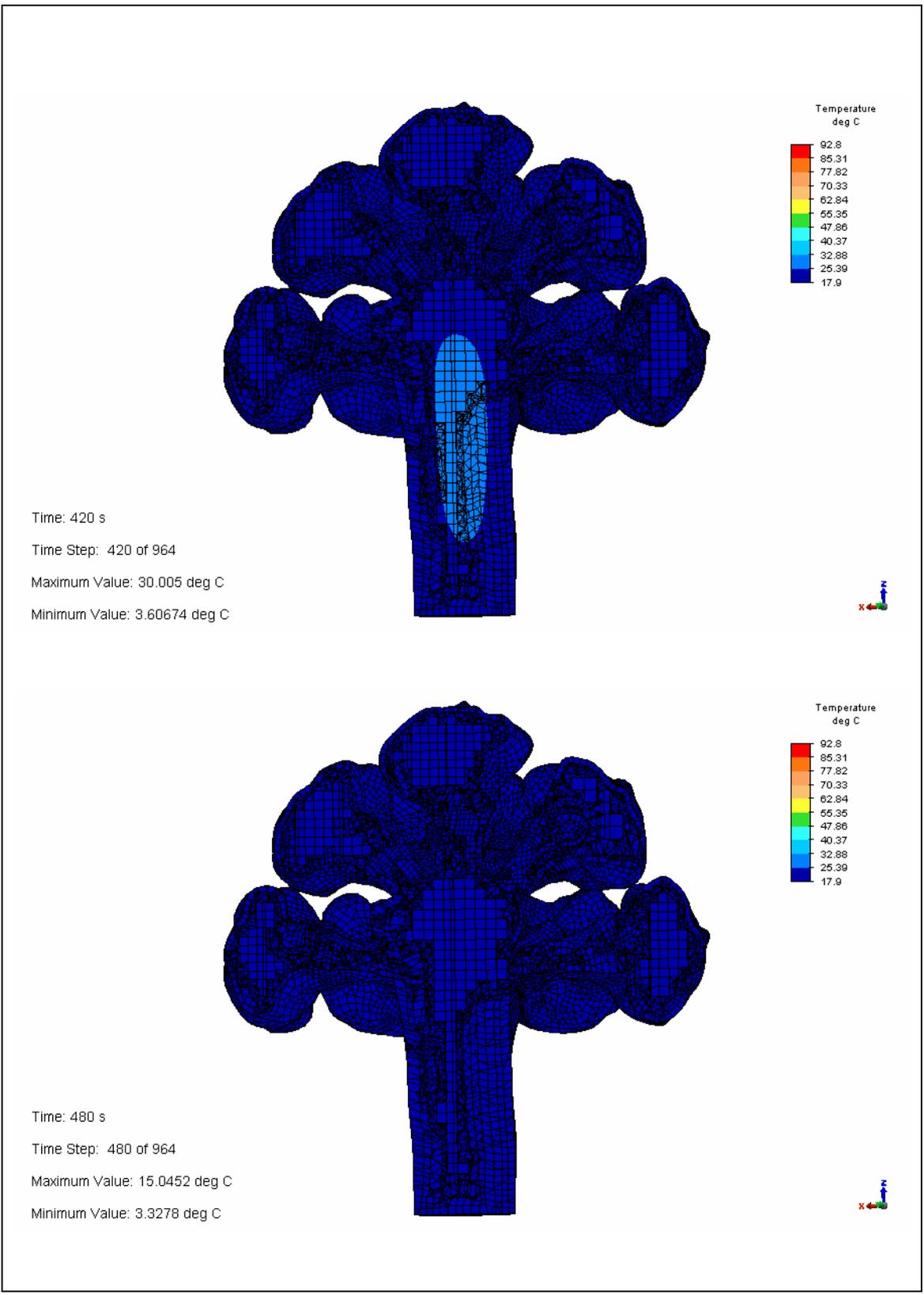


**ANEXO 7.2 Diagramas de contorno del Brócoli 3.**









**ANEXO 7.3 Diagramas de contorno del camarón 1.**