



Estudio del proceso de horneado de productos panificados dulces

Tesis doctoral presentada por María Micaela Ureta
ante la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
para acceder al grado académico de DOCTOR EN INGENIERIA

Director: Dra. Viviana O. Salvadori

Codirector: Dra. Daniela F. Olivera

La Plata, Marzo de 2015

El presente trabajo de Tesis para optar al título de Doctor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA, Fac. de Ciencias Exactas, UNLP - CCT La Plata, CONICET).

Agradecimientos

A la Dra. Viviana Salvadori y a la Dra. Daniela Olivera por haberme guiado, acompañado y por brindarme todo el apoyo para realizar este trabajo de tesis.

Al CIDCA, institución donde se realicé el presente trabajo, a sus directores la Dra. Noemí Zaritzky y el Dr. Mascheroni, y a todas las personas que trabajan para llevar adelante el instituto: personal administrativo, bibliotecaria, investigadores, becarios y personal de limpieza.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata por haberme brindado la posibilidad de acceder al grado de Doctor.

A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por el otorgamiento de las becas que me posibilitaron realizar este trabajo.

A mi familia, mis papás y mis hermanos, por el esfuerzo que hicieron para que hoy esté en este lugar, y sobre todo por haberme acompañado con mucho amor.

A mis amigos por todo su apoyo y contención, por haberle puesto color a todo lo vivido en esta etapa.

Producido de la tesis

Parte de los resultados presentados en este trabajo de tesis doctoral han sido publicados en revistas internacionales con referato y en congresos nacionales e internacionales:

1.-Commercial characterization of madalenas: Relationship between physical and sensory parameters. M. Ureta, D. Olivera and V.O. Salvadori. *Procedia Food Science* 1, 994-1000 (2011).

2.-Quality attributes of muffins: Effect of baking operative conditions. M. M. Ureta, D. F. Olivera, V.O. Salvadori. *Food and Bioprocess Technology* 7, 463-470 (2014).

3.- Baking of muffins: Kinetics of crust color development and optimal baking time. M. M. Ureta, D. F. Olivera, V. O. Salvadori. *Food and Bioprocess Technology* 7, 3208-3216 (2014).

4.- Influencia de la temperatura de horneado en la calidad de madalenas Micaela Ureta, Daniela Olivera, Viviana Salvadori *Actas del VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos CIBIA8* (Lima, Perú), IPP-079 (2011).

5 Analysis of quality attributes of muffins. María M. Ureta, Daniela F. Olivera, Viviana O. Salvadori. *16th IUFOST World Congress of Food Science and Technology* (2012)

6.- Evolución del color superficial durante el horneado de madalenas: herramienta para la predicción del tiempo de cocción. M.M. Ureta, D.F. Olivera, V. O. Salvadori. *IV Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Libro Ingeniería y Tecnología*, 322-328 (2013).

7.- Consumo energético durante el horneado de Madalenas: efecto de las condiciones operativa. M.M. Ureta, D.F. Olivera, V. O. Salvadori. *IV Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Libro Ingeniería y Tecnología*, 329-336 (2013).

8.-Modelado de la transferencia de energía en el horneado de madalenas. M. M. Ureta; D. F. Olivera; V. O. Salvadori. *Actas del XIV Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos, CYTAL* (2013).

9.- Efecto de la humidificación durante el horneado en la calidad de panificados dulces. M.M. Ureta, D. F. Olivera y V. O, Salvadori. Trabajo F203, publicado en *Actas del International Conference on Food Innovation FoodInnova 2014*

10.- Horneado de bizcochuelo: modelado de la transferencia de energía. Ureta M.M., Olivera D. F. y Salvadori V.O. *V Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos* (2014).

Índice

Capítulo 1. Introducción y Objetivos	1
Capítulo 2. Materiales y Métodos	7
2.1 Muestras: Preparación de la mezcla inicial	9
2.1.1 Madalena	9
2.1.2 Bizcochuelo	10
2.2 Estudio fenomenológico del proceso de horneado	12
2.2.1 Equipos y modos de cocción	13
2.2.1.1 <i>Convección natural (CN)</i>	13
2.2.1.2 <i>Convección Forzada (CF)</i>	14
2.2.1.3 <i>Convección Forzada con Humidificación (CFH)</i>	15
2.2.2 Perfil de temperatura de la cámara de cocción	16
2.2.3 Consumo de energía	17
2.2.4 Expansión volumétrica del producto	18
2.2.5 Perfil de temperatura interna	19
2.3 Modelado de la transferencia de energía	21
2.3.1 Propiedades térmicas	23
2.3.2 Simulación numérica	27
2.3.2.1 <i>Dominio de simulación</i>	28
2.3.2.2 <i>Validación</i>	30

2.4 Determinación de parámetros de calidad a través de técnicas instrumentales	31
2.4.1 Evolución de color superficial	32
2.4.2 Pérdida de peso	33
2.4.3 Análisis de la corteza y de la miga	34
2.4.3.1 <i>Contenido de humedad</i>	34
2.4.3.2 <i>Relación corteza/miga</i>	35
2.4.3.3 <i>Espesor de corteza</i>	36
2.4.4 Propiedades estructurales	37
2.4.4.1 <i>Porosidad de la miga</i>	37
2.4.4.2 <i>Densidad global y densidad de miga</i>	39
2.4.4.3 <i>Textura</i>	39
2.5 Estudio Sensorial	42
2.5.1 Aceptabilidad sensorial	42
2.5.1.1 <i>Madalena</i>	43
2.5.1.2 <i>Bizcochuelo</i>	48
2.6 Análisis Estadístico	50
Capítulo 3. Madalenas: Resultados y Discusión	51
3.1. Estudio fenomenológico del proceso de horneado de madalena	53
3.1.1. Perfiles de temperatura del horno	53
3.1.2 Expansión volumétrica	57

3.1.3 Perfiles de temperatura en el interior del producto	60
3.1.4 Modelado de la transferencia de energía	64
3.1.4 Evolución de color superficial	69
3.1.5 Determinación de color óptimo	76
3.1.6 Consumo de Energía	80
3.2. Determinación y análisis de parámetros de calidad de madalena	83
3.2.1 Pérdida de peso	84
3.2.2 Análisis de la corteza y de la miga	86
3.2.2.1 <i>Contenido de humedad</i>	86
3.2.2.2 <i>Relación Corteza/Miga y espesor de corteza</i>	88
3.2.3 Propiedades estructurales	90
3.2.3.1 <i>Porosidad de la miga</i>	90
3.2.3.2 <i>Densidad global y de miga</i>	93
3.2.3.3 <i>Textura</i>	94
3.3 Aceptabilidad sensorial de madalena	96
3.4 Conclusiones	98
 Capítulo 4. Bizcochuelo: Resultados y Discusión	 101
4.1. Estudio fenomenológico del proceso de horneado de bizcochuelo	104
4.1.1. Perfiles de temperatura del horno	104
4.1.2 Expansión volumétrica	106

4.1.3 Perfiles de temperatura en el interior del producto	112
4.1.4 Modelado de la transferencia de energía	118
4.1.5 Consumo de Energía	125
4.2. Determinación y análisis de parámetros de calidad de bizcochuelo	127
4.2.1 Evolución de color superficial	127
4.2.2 Pérdida de peso	132
4.2.3 Análisis de la corteza y de la miga	135
4.2.3.1 <i>Contenido de humedad</i>	135
4.2.3.2 <i>Relación Corteza/Miga y espesor de corteza</i>	137
4.2.4 Propiedades estructurales	138
4.2.4.1 <i>Porosidad de la miga</i>	138
4.2.4.2 <i>Densidad global y de miga</i>	140
4.2.4.3 Textura	141
4.3 Aceptabilidad sensorial de bizcochuelo	142
4.4 Conclusiones	145
 Capítulo 5. Conclusiones generales	 147
 Capítulo 6. Bibliografía	 150

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Introducción y Objetivos

La industria de panificados abarca gran variedad de productos, dentro de los cuales encontramos a los denominados “productos batidos”, entre otros, bizcochuelo, vainilla, budín, madalena. Particularmente en nuestro país, los mismos se encuentran especificados dentro del Código Alimentario Argentino (C.A.A.), en el Capítulo IX: “Alimentos Farináceos- cereales, harinas y derivados”, bajo el título: “Galletas, galletitas y facturas de panadería” (artículos 760, 760 bis, 762 y 766). Allí se definen detalladamente indicando los ingredientes permitidos para su elaboración.

En general, esta clase de alimentos no están incluidos dentro de la canasta básica alimentaria, y son considerados productos *premium*, es decir en general se los consume por placer y esporádicamente. Adicionalmente, los profesionales de la salud recomiendan un consumo moderado de panificados dulces, ya que su contenido de grasa suele superar el 10% y contienen escasa fibra dietaria, como consecuencia, contribuyen al exceso calórico.

Según un estudio realizado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, en 2010 la producción nacional de productos batidos se estimó en 36150 toneladas. Las exportaciones promedio del sector rondaron el 4% de ese volumen. Algunas empresas sobrepasan este promedio mientras que otras declaran exportaciones tan solo del 1% de su producción. En el quinquenio que va de 2006 a 2010, se registró un incremento promedio de la elaboración de productos batidos del 43%. En cambio, las importaciones bajaron un 35% y en ningún año habrían superado el 2% del volumen producido estimado. Asimismo, algunas empresas del sector declaran haber disminuido su producción por la aparición de pequeñas y medianas empresas (Pymes). Sin embargo, en los últimos años, las empresas más importantes del sector manifestaron mejoras en el uso de su capacidad instalada. Las cinco principales firmas elaboradoras de productos batidos del país son: Briosh S.A. (Valente), Dulcypas S.A. (Dulcypas), Plasencia Hnos. S.A. (Pozo), Nutrovo

S.A. (El Caldén), Bon Masé S.A. (Bon Masé y Miss Ivette) y Mauri S.A. (Mauri). Algunas lideran el mercado de piononos, otras el de vainillas, y otras, además de abastecer el consumo masivo, atienden el mercado industrial actuando como proveedoras de los elaboradores de tortas y productos de repostería, cuyos establecimientos emplean como materia prima bizcochuelos y piononos.

En el mismo estudio se informa que particularmente en Argentina, en 2010, el consumo anual per cápita se estimó en 860 gramos, para el conjunto de productos batidos cifra que indica un aumento del 37 % de acuerdo al relevamiento realizado en el 2006. Este incremento del consumo de productos batidos se atribuye a una mayor oferta de presentaciones (en formato personal, como snack dulce o en envases individuales por diez unidades que facilitan el consumo) variedad de nuevos sabores y productos con agregados tales como *chips* de chocolate (Lezcano, 2011).

A nivel mundial, se considera que la industria de alimentos, en especial la industria de productos panificados, ha experimentado una revolución durante los últimos 150 años. Particularmente este sector, desde sus comienzos y durante varias décadas abarcó una producción a pequeña escala de la mano de panaderos artesanos, los cuales con sus productos construían la identidad gastronómica de cada pueblo. Gracias a la versatilidad del pan como alimento y al proceso de globalización cultural que alcanzó también a las costumbres de alimentación, acompañado por una abundante producción mundial de trigo, se dieron las condiciones para el desarrollo y la modernización que hoy en día caracterizan a la industria de panificados.

De manera de poder responder a esta transición y a las demandas de un mercado creciente en volumen y exigencia, se impulsó el desarrollo de tecnología específica para este sector de la industria, lo cual fue clave para la mejora continua en términos de productividad y eficiencia de los procesos (Decock y Cappelle, 2005). Estos avances son el resultado de innovación tanto en el área de materia prima e ingredientes como en equipamiento y nuevas maquinarias. En este sentido, resulta fundamental el trabajo de profesionales enfocados en la eficiencia del proceso teniendo en cuenta la calidad y mejora nutricional del producto (Mondal y Datta, 2008).

En la figura 1.1 se muestra un diagrama general del proceso de producción industrial de panificados dulces, que consta de las siguientes etapas: formulación y mezcla (batido) de los ingredientes, dosificación del producto en moldes específicos, horneado, enfriamiento, envasado y distribución (Tireki, 2008).

Todas las etapas indicadas en la figura 1.1 influyen de un modo u otro en la calidad del producto final. Así, en primera instancia se encuentra la correcta selección de los ingredientes (harina, huevos, materia grasa, saborizantes, agentes leudantes, aditivos o premezclas industriales que abarquen todos o algunos de éstos) y una adecuada formulación (proporción de cada ingrediente). De esta manera existe una gran variedad de productos que se pueden obtener de las distintas recetas. Como segunda instancia, el batido de los ingredientes es fundamental, ya que las características de la mezcla obtenida influyen de manera directa en desarrollo de la expansión, de

las características de textura y de la porosidad del producto durante el horneado. Seguidamente, el tamaño y forma del molde que se utilice en la instancia de dosificación son claves en el diseño del proceso de cocción y también determinan las características del producto final. Pero sin lugar a dudas la etapa principal de esta línea de producción es el horneado propiamente dicho.

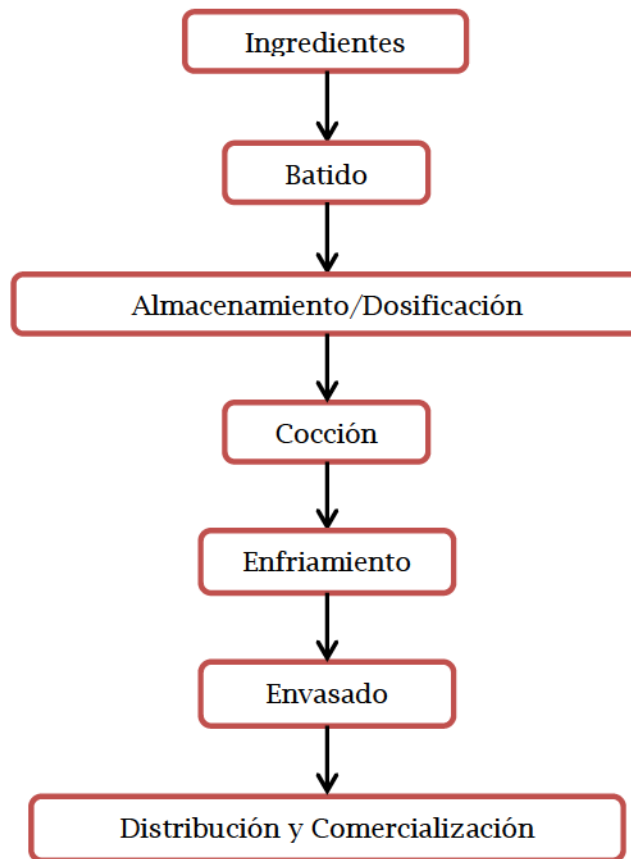


Figura 1.1. Diagrama de flujo de la producción de productos batidos.

El estudio del horneado puede orientarse a la caracterización del proceso en base a los equipos utilizados, haciendo foco en el consumo de energía y en la eficiencia de los mismos. En la actualidad, se cuenta con diversidad de equipos y tecnologías. Una clasificación general según la fuente de energía y el volumen de producción, es la siguiente:

- ✓ hornos convencionales (el aire caliente circula por convección natural y la fuente de calor puede ubicarse tanto en la parte superior y/o inferior, como en las paredes del horno)
- ✓ hornos convectivos (la circulación de aire caliente es impulsada por uno o varios ventiladores)
- ✓ hornos microondas
- ✓ hornos impingement (flujo de aire caliente a gran velocidad dirigido puntualmente al producto)

- ✓ hornos industriales continuos: túnel, modulares, rotativos
- ✓ hornos con inyección de vapor, variante que ha surgido en los últimos años, principalmente con el objetivo de lograr mejoras en la textura y apariencia de los productos panificados (Xue y col., 2004; Sommier y col., 2005; Le Bail y col., 2011; Schirmer y col., 2011).

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta relacionado directamente con el equipamiento a utilizar es el consumo energético y la eficiencia del proceso. Esta consideración se debe tanto a intereses económicos (reducción de costos) como así también a una mayor conciencia global del cuidado del medioambiente y a su vez, a la crisis energética mundial de los últimos años (Khatir y col., 2013) de la que no escapa nuestro país. Refiriéndonos al horneado en equipos que emplean aire caliente como medio calefactor, este consumo se distribuye en energía transferida al producto (calentamiento del producto, deshidratación y formación de corteza superficial) y pérdidas al ambiente (aperturas de puertas y pérdidas a través de las paredes).

Otro enfoque del estudio del horneado se orienta al análisis de las transformaciones que ocurren en el producto: cambio de volumen (en general expansión), evaporación de agua superficial que origina la formación de una corteza deshidratada, formación de una estructura interna porosa (miga), reacciones de pardeamiento que inducen cambios de color (browning), entre otros. Todos estos cambios son producto de los fenómenos de transferencia de materia y energía directamente relacionados con el incremento de la temperatura en el interior del producto.

En la bibliografía consultada se han encontrado numerosos estudios basados en el modelado matemático de los fenómenos físicos involucrados. Los primeros trabajos analizaron el horneado de pan (Zanoni y col., 1994; Jefferson y col., 2007; Mondal y Datta, 2008; Purlis y Salvadori, 2009a, b; Channwal y col. 2011). En los últimos años se ha avanzado en la simulación del proceso de horneado de distintos panificados dulces (Hadiyanto y col., 2007; Ferrari y col., 2012; Sakin-Yilmazer y col., 2012; Andresen, 2013). Estos modelos resultan una herramienta para calcular distintas variables de proceso, entre otras, tiempo de cocción, pérdida de peso, consumo de energía, expansión volumétrica. No obstante son escasos los trabajos que consideran el horneado de una mezcla inicial fluida que experimenta una expansión volumétrica cercana al 100%, producto del proceso de levado que ocurre en el interior de la cámara del horno mismo.

A su vez, numerosos autores han estudiado particularmente los parámetros de calidad, en general del producto obtenido al final de la cocción. Dentro de los indicadores de calidad, el color superficial, producto de las reacciones de caramelización y de Maillard dependientes de la temperatura superficial del producto, es una de las características más relevantes (Broyart y col., 1998; Isleroglu y col., 2012; Sakin-Yilmazer y col., 2013). También se manifiesta un interés creciente en el control de estas reacciones, de manera de cuantificar la concentración de productos nocivos para la salud, tales como acrilamida e hidroximetilfurfural (Ait Ameer y col., 2006, Gökmen y col., 2008, Isleroglu y col., 2012).

Otras características fundamentales que definen la calidad final de estos productos son la formación de la corteza (tanto el espesor como el nivel de deshidratación de la misma), la relación corteza/miga, la granulometría, la densidad y propiedades mecánicas de la miga (Lassoued y col., 2007, 2008), tamaño y homogeneidad de poros (Rouillé y col., 2005; Gómez-Barron y Butler, 2006).

Además de estos parámetros físicos, los atributos sensoriales (aceptabilidad global, la apariencia, la textura, el color, el sabor, la consistencia de miga, la crujencia, entre otros) permiten evaluar la calidad teniendo en cuenta las preferencias de los consumidores (Martínez-Cervera y col., 2012).

Luego de analizar el creciente consumo y el desarrollo del sector productivo de panificados dulces y teniendo en cuenta los antecedentes bibliográficos del tema, se presenta como objetivo general de este trabajo de tesis: el estudio integral de la influencia de las condiciones operativas de horneado sobre los parámetros de proceso, las reacciones responsables de la formación del producto y la calidad final de productos panificados dulces.

En función de este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Identificar diferentes condiciones de proceso factibles
- ✓ Estudiar experimentalmente el proceso de horneado analizando el tiempo de proceso, el rendimiento y el consumo energético
- ✓ Modelar matemáticamente la transferencia de energía
- ✓ Caracterizar la calidad del producto mediante técnicas instrumentales
- ✓ Evaluar la aceptabilidad del producto final mediante análisis sensorial
- ✓ Vincular los parámetros instrumentales y los atributos sensoriales con las condiciones operativas

Para cumplir con estos objetivos se eligieron dos productos que son ampliamente consumidos en el mercado local argentino y, por tanto, producidos en pequeña, mediana y gran escala: madalena y bizcochuelo.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales y Métodos

Dentro de la categoría “panificados dulces” se encuentran una gran variedad de productos con distintas apariencias, texturas, aromas, valores nutricionales y vida útil; entre otros distintos tipos de tortas, galletitas, donas, pasteles, etc. Si bien todos ellos están preparados con una serie de ingredientes en común (harina de trigo refinada, azúcar, huevos y materia grasa), presentan una infinidad de variantes en sus formulaciones, que tienen que ver con la cultura o simplemente la tradición del lugar donde se los fabrique y/o consuma.

De acuerdo a los objetivos planteados en este trabajo de tesis, se propone el seguimiento del horneado de dos productos típicos, madalena y bizcochuelo. La elección de estudiar estos dos productos dentro de la amplia variedad de panificados dulces anteriormente mencionada, no es azarosa. Se trata de dos productos de geometría cilíndrica, con su superficie superior redondeada, pero de volúmenes bien diferenciados.

La madalena es una pequeña torta (su volumen suele rondar los 90 cm³) cuyo consumo apunta principalmente al de bocadito individual. Debido a su funcionalidad de snack dulce, por lo general contiene gran cantidad de azúcares, aromatizantes y saborizantes en su composición. Para darle su forma característica se la hornea en moldes individuales descartables de aluminio o de papel rizado, y en moldes reutilizables de silicona. Suele encontrarse con sabores de vainilla, limón o marmoladas y rellenas con distintos dulces, jaleas o mermeladas, que se agregan al producto ya cocido. Los primeros registros de consumo de este producto datan del año 1750, en la ciudad de Lorraine, Francia, y luego el producto se expandió a toda Francia, España y Latinoamérica (Caffier, 2006).

Por otro lado, el bizcochuelo es una torta esponjosa, de un volumen considerablemente mayor, ya que su consumo está relacionado con el de un alimento para compartir y repartir en porciones. Por lo general es de sabor vainilla, y como suele prepararse con rellenos y decorados diversos, su composición es levemente dulce y con menor cantidad de saborizantes que las madalenas. Es un producto que desde el siglo XIX es altamente reconocido y consumido en todo el mundo.

A continuación, se describen los materiales y métodos empleados en este estudio.

2.1 Muestras: Preparación de la mezcla inicial

De manera de poder estudiar únicamente la influencia de las condiciones operativas, se trabajó con dos formulaciones estandarizadas e invariables a lo largo de los ensayos, una por cada producto. Con este objetivo se eligió una premezcla comercial, Tegral Satin Cream Cake, Puratos Argentina (www.puratos.com.ar), que contiene los siguientes ingredientes: harina de trigo 0000 enriquecida, azúcar, almidón de trigo, leudantes químicos, sal, esencias artificiales, disponible en formato de polvo seco (en bolsones de 10 kg). La misma suele ser usada en panaderías y pequeñas industrias de panificados y tiene la particularidad que, dependiendo de los ingredientes húmedos que se adicionen, permite obtener distintos tipos de productos panificados dulces.

Para definir la composición a seguir, tanto de madalena como de bizcochuelo, fueron consultadas y analizadas varias recetas propuestas en distintos sitios gourmet y se buscó una fórmula que pueda adaptarse usando la premezcla seleccionada, respetando la composición nutricional y el contenido de humedad promedio de cada producto, tomando como referencia productos similares disponibles en el mercado local.

2.1.1 Madalena

Las madalenas fueron preparadas a partir de la mencionada premezcla, de acuerdo a la siguiente receta: 250 g de premezcla, 50 g de margarina, 100 g de leche y 60 g de huevos frescos. Todos los ingredientes se batieron durante 5 minutos a velocidad constante de 240 rpm en una multiprocesadora (Rowenta Universo 700, Francia). En la tabla 2.1 se informa la composición nutricional de la mezcla preparada, comparándola con composiciones de madalenas de marcas comerciales disponibles en el mercado argentino. Estas últimas fueron objeto de estudio de un trabajo preliminar en el cual se pusieron a punto algunas de las técnicas de análisis a utilizar en el presente trabajo de tesis y se identificaron los atributos de calidad preferidos por los consumidores de este tipo de productos.

La mezcla resultante se hornea en moldes individuales de aluminio descartables, de 4.7 cm de diámetro máximo y 5 cm de alto (capacidad efectiva: 110 cm³), colocando en cada uno 40 g de mezcla lista para hornear (figura 2.1), con una altura inicial de 2 cm.

Tabla 2.1. Composición (% b.s.) de madalena (previa al horneado) y de distintas marcas comerciales (producto final).

	Mezcla madalena	Marca comercial 1	Marca comercial 2	Marca comercial 3	Marca comercial 4
Hidratos de carbono	68.70	74.15	70.50	71.10	69.20
Proteínas	7.90	8.05	11.75	7.40	6.95
Grasas	20.80	17.40	15.80	20.25	23.75
Fibra	2.30	0.00	1.95	0.75	0.00
Sodio	0.35	0.40	0.15	0.46	0.10

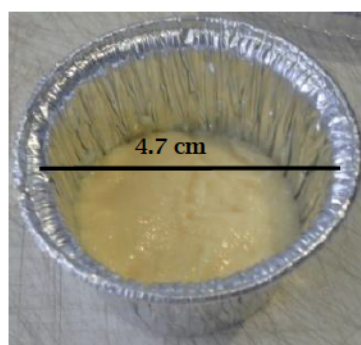


Figura 2.1. Molde individual de aluminio con la mezcla inicial de madalena.

2.1.2 Bizcochuelo

Para la preparación de la mezcla de bizcochuelo, se batieron en primer lugar 270 g de huevo entero fresco en una multiprocesadora (Rowenta Universo 700, Francia) durante dos minutos (hasta lograr punto espuma blanca), luego se incorporaron 360 g de premezcla prolongando el batido tres minutos más.

La composición nutricional final de esta preparación se detalla en la tabla 2.2. A diferencia de la madalena, este producto tiene mayor aporte proteico y menor tenor graso. El mayor contenido proteico, fundamentalmente brindado por la presencia de huevos en la preparación, está directamente relacionado con la funcionalidad de este producto. Como se mencionó previamente, el bizcochuelo suele ser un producto utilizado para rellenar y decorar con lo cual la estructura de este alimento debe estar bien conformada para soportar distintas fuerzas

viscosas que se generan debido a los ingredientes añadidos luego de la cocción (Indrani y Rao, 2008). En este sentido la espuma resultante del batido de los huevos es un aporte fundamental para la matriz proteica. A modo comparativo se presenta en la misma tabla 2.2 la composición porcentual de otros productos similares disponibles en el mercado local.

Tabla 2.2. Composición porcentual (% b.s.) de bizcochuelo (previo al horneado) y de productos similares disponibles en el mercado local (producto final).

	Mezcla bizcochuelo	Marca comercial 5	Marca comercial 6
Hidratos de carbono	70.9	73.2	71.0
Proteínas	15.2	13.0	11.1
Grasas	11.3	12.2	16.1
Fibras	2.0	1.2	1.5
Sodio	0.6	0.3	0.3

La mezcla se horneó empleando un molde de aluminio, cilíndrico, de 18 cm de diámetro y 7 cm de alto, con la base forrada en papel metálico de modo de facilitar el desmolde (figura 2.2). Para cada muestra se vertieron 500 g del batido por molde, resultando una altura inicial, uniforme, de 2.5 cm.

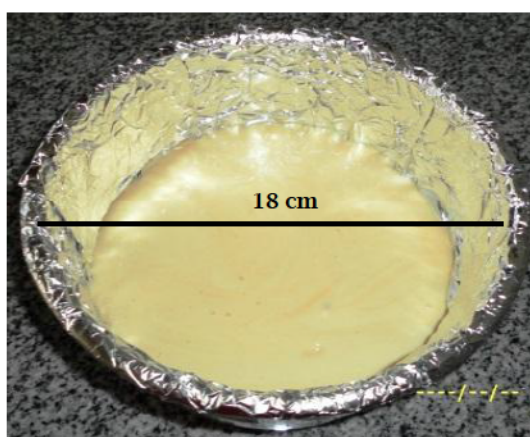


Figura 2.2. Molde individual de aluminio con la mezcla inicial de bizcochuelo.

2.2 Estudio fenomenológico del proceso de horneado

El proceso de horneado es una instancia clave para los productos de panadería y pastelería, durante la cual la masa inicial es transformada en un material sólido liviano y poroso

(Andresen, 2013). A su vez, permite desarrollar todos los sabores y aromas característicos de los productos. En otras palabras, es la instancia en la cual se desarrollan los indicadores de calidad del producto final apreciados por los consumidores. Debido a esto, el proceso debe ser cuidadosamente controlado, especialmente la velocidad y la cantidad de calor transferido, el nivel de humedad de la cámara de horneado y el tiempo de horneado (Therdthai y col., 2002).

Como antecedentes encontramos numerosos estudios enfocados en determinados aspectos del proceso de horneado, de diferentes productos panificados. En este sentido, Therdthai y col. (2002) establecieron un perfil de temperatura de horno óptimo en función del color de la corteza en el horneado de pan de molde, a partir de regresiones empíricas que vinculaban perfil de temperatura, tiempo de horneado, pérdida de peso y color de la corteza, obtenidas en un horno prototipo que simulaba un horno industrial continuo. Baik y col. (2000a, b) caracterizaron dos hornos continuos industriales, uno a gas y otro eléctrico, registrando los perfiles de temperatura, velocidad de aire y humedad absoluta del interior de los equipos. En este estudio evaluaron la cocción de cuatro variedades de tortas (distintas recetas y formas de los respectivos moldes). Baik y Marcotte (2002) analizaron la difusión de agua en el interior de bizcochuelo durante el proceso de horneado teniendo en cuenta varios niveles de contenido de humedad iniciales. Debido al pequeño espesor de estas muestras el horneado es prácticamente una etapa de secado, los autores propusieron una difusividad efectiva en función de la temperatura y la porosidad del producto. Análogamente, Sakin y col. (2007a) también validaron un modelo difusivo durante el horneado de bizcochuelo en función del contenido de humedad y de la temperatura de horneado, partiendo de la solución analítica de transferencia de masa, trabajando con muestras de unos pocos milímetros de espesor. Zareifard y col. (2009) estudiaron experimentalmente la incidencia de distintos perfiles operativos (modificando temperatura, velocidad y dirección del aire) de un horno convectivo en la expansión volumétrica y la textura de cupcakes. Purlis y Salvadori (2009a) relacionaron la evolución del color de la corteza de panes (medido por visión computacional) con la pérdida de peso, para distintas condiciones de horneado. Fehaili y col. (2010) emplearon un horno eléctrico prototipo para estudiar los cambios físicos y químicos durante el horneado de bizcochuelo, analizando distintas temperaturas de horneado. Le-Bail y col. (2011) analizaron la influencia de la inyección de vapor en la cámara de horneado en los perfiles de temperatura y en diversos parámetros de calidad (volumen específico, pérdida de peso, relación corteza/miga), en el horneado de pan. Andresen (2013) estudió el horneado de galletitas de manteca danesas, empleando un horno prototipo que simula un horno continuo tipo túnel.

En el presente trabajo, para los dos productos analizados, se estudiaron tres modos de horneado: convección natural (CN), convección forzada (CF) y convección forzada con humidificación (CFH). En todas ellas, como su nombre lo indica, el principal mecanismo de transferencia de calor dentro de la cámara de horneado es la convección, es decir la

transferencia de energía debido al movimiento aleatorio de las moléculas de aire y al movimiento global o macroscópico del mismo.

Con el fin de estudiar exhaustivamente el desempeño de los equipos y el horneado de los productos para cada modo de cocción se realizaron numerosos ensayos de horneado, con cada producto por separado. Así, para analizar el horneado de madalena se diseñaron cinco series de experiencias para cada modo de cocción ensayado, fijando la temperatura nominal (T_{nominal}) del horno correspondiente en 140, 160, 180, 200 y 220 °C. Respecto al horneado de bizcochuelo las experiencias fueron realizadas a tres temperaturas nominales: 140, 160 y 180 °C, para cada modo de cocción ensayado. Experiencias preliminares indicaron que, con este segundo producto, empleando mayores temperaturas de procesamiento para asegurar la cocción completa del mismo, el desarrollo de color superficial avanzaba a una instancia que provocaba un color muy oscuro. La duración de los distintos ensayos no fue uniforme sino que quedó determinada principalmente por el producto y por distintos criterios que serán detallados en las secciones siguientes.

2.2.1 Equipos y modos de cocción

2.2.1.1 Convección natural (CN)

El modo de calentamiento del horno genera un determinado perfil de temperatura en el aire de la cámara de horneado que a su vez provoca un perfil de densidad del aire que a través de fuerzas de empuje o flotación induce el movimiento del mismo, este mecanismo se denomina convección natural o libre (Bird y col., 2011).

Para realizar las experiencias en esta condición se utilizó un horno eléctrico doméstico (AristonFM87-FC, Italia, figura 2.3), cuyas dimensiones útiles son 0.4 m de largo, 0.39 m de profundidad y 0.34 m de altura (53 l de volumen útil), y cuenta con rejillas interiores que se pueden ubicar a distintas alturas.

Este equipo cuenta con varios modos de operación, entre otros: “modo convencional”, donde dos elementos calefactores calientan el aire de la cámara del horno y el movimiento del aire se produce por convección natural; “modo forzado”, donde además de los elementos calefactores se enciende un ventilador ubicado en parte posterior de la cámara del horno, el cual produce un movimiento adicional del aire; “modo con radiación”, donde se utiliza una resistencia calefactora adicional ubicada en la parte superior de la cámara del horno, con o sin el uso del ventilador. Todas las experiencias realizadas en este horno emplearon el modo convencional.



Figura 2.3. Horno doméstico Ariston utilizado para los ensayos en el modo CN.

2.2.1.2 Convección forzada (CF)

Se habla de convección forzada cuando el movimiento de un fluido es causado por medios externos. Los hornos de convección forzada tienen ventiladores que mantienen el aire caliente del interior circulando constantemente, a una velocidad mayor que la que se alcanza en condiciones de convección natural. Así, se logra descomponer la delgada capa de aire frío que naturalmente rodea a los alimentos que se colocan en el horno, aumentando el coeficiente de transferencia de calor y en consecuencia beneficiando el intercambio de energía entre el medio calefactor y el producto (Bird y col., 2011). Como consecuencia, los hornos con ventilación son ampliamente utilizados en la producción industrial de alimentos.

Para realizar los ensayos correspondientes a este modo, en este estudio se trabajó con un horno eléctrico semi-industrial con convección forzada (MultiequipHCE-3, Argentina). El mismo está diseñado para un rendimiento de cocción de hasta tres docenas de medialunas o empanadas en 12/15 minutos. Cuenta con tres bandejas extraíbles y las dimensiones de la cámara de cocción del mismo son 0.42 m de largo, 0.4 m de profundidad y 0.35 m de altura (58 l de volumen útil). La circulación de aire es propulsada por un ventilador instalado en la pared trasera del horno, con una velocidad de 2.8 m s^{-1} , la cual fue medida con un anemómetro de turbina (TESTO 435, Alemania) ubicado en el mismo nivel de la cámara del horno donde se colocan las muestras para la cocción. Este equipo a su vez, cuenta con una balanza de 0.01 g de precisión (LasarteEL5, Argentina) acoplada al sistema, la cual permite medir en continuo el peso de las bandejas con las muestras, gracias a dos celdas de carga (figura 2.4). En la práctica se trabajó llevando a cero el valor de lectura al comienzo de la experiencia de horneado, de modo tal que la lectura representase la variación de peso del conjunto de muestras horneadas en

simultáneo (en el caso de madalena) o del bizcochuelo. Debido a dificultades propias del software de la balanza que no permitía grabar los valores de peso de modo continuo, los valores fueron registrados manualmente cada 30 segundos a partir de la lectura del panel de la balanza.

2.2.1.3 Convección forzada con humidificación (CFH)

Otra variante de procesamiento ampliamente utilizada en hornos industriales o semi-industriales es la incorporación de vapor de agua a la cámara del horno. Si bien es una condición que falta explorar científicamente (Schirmer y col., 2011), en la práctica panadera es sabido que la humedad ambiente de la cámara del horno afecta el desarrollo del color superficial de los productos (reacción de Maillard) e induce menor formación de acrilamida, compuesto perjudicial para la salud. Asimismo condiciona la expansión del producto, la deshidratación superficial y la firmeza de la miga (Le Bail y col., 2011).

En consecuencia, en este trabajo también se evalúa experimentalmente este modo de cocción, utilizando el equipo semi-industrial con convección forzada (figura 2.4). El mismo cuenta con un reservorio de agua que mediante una válvula regula el paso de agua a la cámara de horneado. En este recorrido el agua líquida se convierte inmediatamente en vapor debido a que circula por una zona de alta temperatura, donde se encuentran las resistencias calefactoras.



Figura 2.4. Horno semi-industrial MultiequipHCE-3 utilizado para los ensayos en los modos CF y CFH.

Para los ensayos de cocción de madalena y bizcochuelo se generó vapor a partir de 300 y 600 ml de agua, respectivamente. Este volumen fue distribuido en tres fracciones inyectadas al inicio, y a tiempos aproximadamente iguales a 0.3 y 0.7 del tiempo total de cocción de madalenas, mientras que para bizcochuelo el volumen total se dividió en cinco fracciones inyectadas al inicio y en los instantes 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 del tiempo total de cocción del mismo.

En todos los ensayos el horno correspondiente fue precalentado durante varios minutos hasta alcanzar la temperatura nominal, momento en el cual se introducían las muestras a hornear. En cada ensayo de horneado de madalena, se colocaron cinco muestras sobre la rejilla o bandeja ubicada en el nivel central de la cámara de horneado respectiva. Por otro lado para cada ensayo de cocción de bizcochuelo, se trabajó con una muestra ubicada sobre la rejilla o bandeja inferior.

2.2.2 Perfil de temperatura de la cámara de cocción

Los elementos calefactores de ambos equipos utilizados en este trabajo, y en general en todos los hornos eléctricos, son resistencias eléctricas, cuyo encendido y apagado es regulado por un mecanismo de control de tipo ON-OFF, propio de cada equipo: se encienden hasta alcanzar o apenas superar la temperatura nominal, luego se apagan y cuando la temperatura en el interior de la cámara desciende por debajo de un valor mínimo (propio del sistema de control de cada equipo) se encienden nuevamente.

Teniendo en cuenta que la temperatura de cocción es uno de los parámetros principales que caracterizan el proceso de horneado y que de acuerdo al funcionamiento propio de los elementos calefactores la temperatura del interior de la cámara de cocción no es constante, resulta fundamental conocer su evolución durante la cocción.

En el presente trabajo, se registraron los perfiles de temperatura de la cámara de cocción (T_{horno}) durante el horneado de cada producto bajo cada condición ensayada, utilizando termocuplas de tipo T (Omega, EEUU) conectadas a un adquisidor de datos (Keithley DASTC, EEUU) incorporado a una computadora (figura 2.5). En cada experiencia de cocción dos termocuplas, colocadas próximas a la ubicación de las muestras, registraron la variable T_{horno} por duplicado.

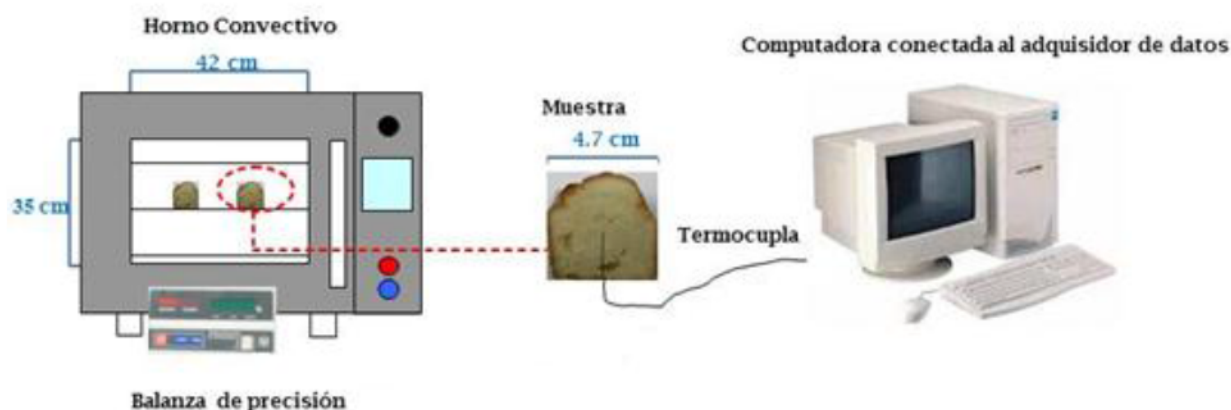


Figura 2.5. Esquema de muestra-horno conectado al equipo de adquisición de temperatura.

2.2.3 Consumo de energía

Durante la evolución de la industria de panificados, los hornos comerciales han sido diseñados bajo estándares que respondían a la cantidad y la calidad de la producción. Sin embargo, actualmente se está prestando particular atención al consumo energético en el desarrollo de estas tecnologías, no solo bajo el fin de minimizar los costos y aumentar la eficiencia de los procesos, sino también respondiendo a regulaciones internacionales que están comenzando a aplicarse con el objetivo de reducir el consumo de combustibles y el calentamiento global (Khatir y col., 2012, 2013).

Particularmente, para este sector de la industria de alimentos se estima un consumo entre 5 y 10 MJkg⁻¹. En general, la mitad de este consumo lo demanda la etapa de horneado, mientras el resto es energía requerida por la tecnología de transporte, el proceso de elaboración (mezcladoras) y los procesos de enfriamiento, envasado, distribución, etc. (Industrial Energy Efficiency Accelerator-IEEA-, 2011).

A su vez, la demanda energética del proceso de horneado depende de distintos aspectos, entre ellos, el consumo del horno en sí, la energía absorbida por el producto y la demanda relacionada al volumen de producción que abarque el proceso. Entre otros factores se deben considerar las pérdidas de energía debido a las características constructivas del equipo (material de aislación y espesor de las paredes de la cámara de horneado), el calentamiento y mantenimiento de la temperatura en la cámara (sistema de control del equipo), el calentamiento del producto y su eventual deshidratación (directamente relacionado a la formulación, tipo y tamaño del producto) y otras pérdidas (apertura del horno, ingreso y egreso del producto). En consecuencia, el consumo de energía se encuentra significativamente afectado por las características propias del equipo y también por las condiciones operativas: temperatura de cocción, tiempo de proceso, convección natural o forzada, humidificación, entre otras. La convección forzada, si bien demanda mayor consumo por el uso de ventiladores para impulsar

el aire dentro de la cámara de horneado, permite una mejor distribución de la energía, que favorece el establecimiento de temperaturas de horneado uniformes, especialmente en equipos de gran tamaño y en general, reduce los tiempos de cocción.

Teniendo en cuenta el objetivo general de esta tesis, resultó primordial evaluar el consumo energético bajo las distintas condiciones operativas ensayadas al estudiar la cocción de ambos productos estudiados.

De acuerdo al tipo de funcionamiento ON-OFF de ambos hornos eléctricos empleados, el consumo energético (CE, kJ kg⁻¹, ecuación 2.1) puede calcularse afectando la potencia nominal del horno (PN, kW) por un factor de uso (f, adimensional), el cual tiene en cuenta la utilización efectiva del horno, y el tiempo de cocción por unidad de masa (t', s kg⁻¹) (Goñi y Salvadori, 2012):

$$CE = PN f t' \quad (2.1)$$

La potencia nominal es un valor constante informado por el fabricante del equipo. El horno AristonFM87-FC (empleado para los ensayos de convección natural, CN) presenta un valor de PN=1.98 kW, en el horno MultiequipHCE-3 (empleado para la cocción bajo convección forzada, CF y CFH) la potencia informada por el fabricante es PN=1.8 kW.

El factor de uso fue calculado a partir de la curva experimental de temperatura del horno, medida para cada condición operativa, definiéndolo como la fracción de tiempo de calentamiento, es decir, la suma acumulada de intervalos de tiempo en los cuales las resistencias calefactoras estuvieron encendidas durante cada experiencia, t_{encendido}, respecto del tiempo total de horneado.

2.2.4 Expansión volumétrica del producto

Durante el horneado, y como consecuencia del calentamiento del producto, se incrementa la presión de vapor de agua, asimismo se verifica la formación de dióxido de carbono el cual comienza a difundir en las burbujas de aire. Ambos fenómenos provocan la expansión de la mezcla. A medida que continúa aumentando la temperatura interna el almidón presente gelatiniza y las proteínas coagulan. De este modo la evolución de la temperatura durante la cocción es un factor decisivo en la conformación y en las características de la estructura final de los productos horneados (Kocer y col., 2007).

Para las muestras de madalena, los ensayos preliminares mostraron la dificultad para medir la evolución continua de la altura durante el proceso. En primer lugar al tratarse de una muestra relativamente pequeña la introducción de un sistema milimetrado en su interior para observar la evolución de altura implica un obstáculo en el desarrollo de su forma característica. Por otro lado, dado que estas muestras requieren procesos de cocción de pocos minutos, el

cambio de volumen se verifica en períodos de tiempo cortos, introduciendo un error considerable al momento de la lectura. Por estas razones en este producto se decidió medir la altura inicial, uniforme, y dos valores de altura característicos del producto final: centro (eje axial) y borde, ambos medidos sobre la corteza superior en un corte transversal de la muestra, utilizando un calibre. Este ensayo fue realizado por cuadruplicado para cada condición operativa.

Para las muestras de bizcochuelo dado que el volumen de las mismas y la duración del horneado son mayores fue posible medir la evolución de la altura durante el proceso sin retirarlas del horno.

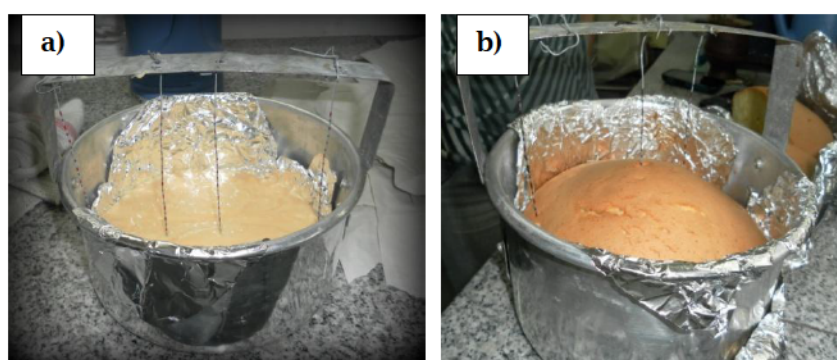


Figura 2.6. Molde con las varillas para medir evolución de altura de bizcochuelo. Mezcla inicial (a) y producto final (b).

Con este objetivo, y solo para utilizar en este ensayo, se adaptó un molde de igual dimensiones al detallado en la sección 2.1.2, fijando en su base varillas verticales ubicadas en distintas posiciones a lo largo del diámetro del mismo: $r=0$ (centro), $r=3.5$ cm, $r=6.5$ cm y $r=9$ cm (pared del molde, figura 2.6). Las varillas tienen impresa una escala con 5 mm de graduación. Una vez ingresada la muestra en el horno se registró el tiempo en que se visualiza (sin abrir la puerta del equipo) que la superficie de bizcochuelo llega a cada marca, para las cuatro varillas mencionadas. Este ensayo fue realizado por duplicado para cada condición de horneado ensayada.

2.2.5 Perfil de temperatura interna

Como ya se mencionó, las reacciones responsables de las transformaciones que sufre la mezcla durante la cocción (desnaturalización de proteínas, gelatinización del almidón, caramelización de azúcares) son fuertemente dependientes de la temperatura. Debido a esto, resulta primordial contar con la historia térmica en el interior del producto para poder evaluar

el proceso de cocción. Conocer la evolución de la temperatura permite no solo controlar las velocidades de calentamiento y por tanto las cinéticas de las reacciones dependientes, sino también ayuda a interpretar el fenómeno de transferencia de energía en el interior del producto.

Por consiguiente, se registró la temperatura interna de los productos utilizando también termocuplas tipo T, y el adquisidor de datos ya mencionado. En las madalenas, debido al volumen pequeño de la muestra, solo se colocó una termocupla por muestra, ubicándola en cercanías del centro térmico respecto del producto final (figura 2.7).

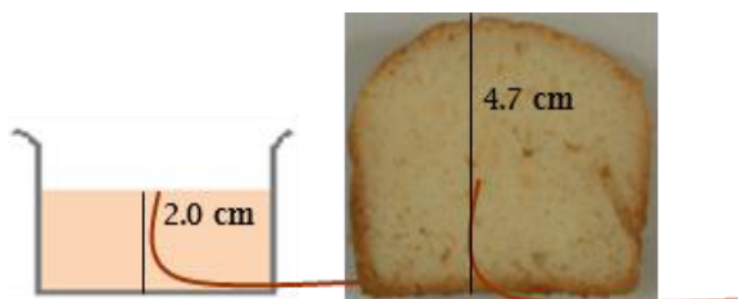


Figura 2.7. Posición inicial y final (imagen izquierda y derecha, respectivamente) de la termocupla en el interior de la madalena.

De modo de asegurar la posición de la termocupla, ésta se colocó en el interior del molde, fijándola al mismo, antes de colocar la mezcla. Las historias térmicas fueron registradas por duplicado para cada condición ensayada.

Para el registro de la evolución de la temperatura interna durante la cocción de bizcochuelo, fue posible trabajar con tres termocuplas en distintas posiciones sin interferir en el desarrollo de volumen o características propias del producto (figura 2.8).

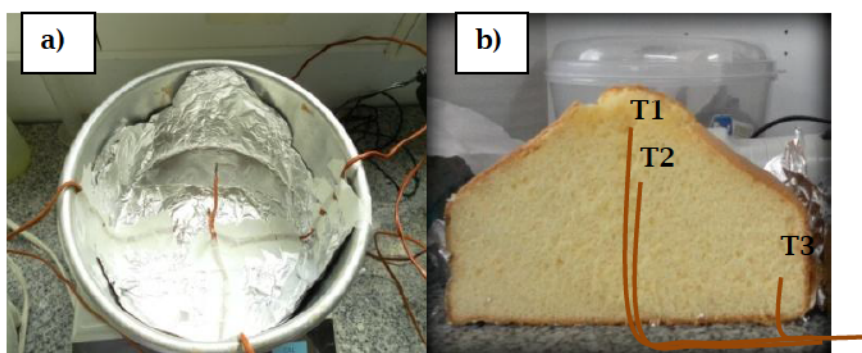


Figura 2.8. a) Molde con las termocuplas colocadas previas a introducir la mezcla. b) Posición final de las termocuplas en el bizcochuelo horneado.

Dos de las termocupas se ubicaron en el eje axial central de la muestra ($r=0$) a distintas alturas, medidas desde la base del molde: una a 7.5 cm (T1) y la otra a 5.5 cm (T2). Ambas quedaban por fuera de la muestra al momento inicial de la cocción y a medida que el bizcochuelo se expandía fueron cubiertas por el mismo. Una tercera termocupla (T3) se colocó cercana al borde lateral del molde ($r= 7.5$ cm) y a 2 cm de la base del mismo. Esta última desde el momento inicial de la cocción se encontraba cubierta por la muestra. Los ensayos de registro de temperatura se realizaron por duplicado.

2.3 Modelado de la transferencia de energía

Además de estudiar el horneado desde el punto de vista fenomenológico o experimental, resulta de interés simularlo a través del modelado matemático. Para que represente con fidelidad el proceso, éste debe incorporar adecuadamente todos los factores que influyen en el mismo: condiciones de horneado (temperatura, convección natural o forzada, ausencia o presencia de humidificación del ambiente), transición de mezcla fluida a miga, desarrollo de color superficial, crecimiento de la corteza superficial, expansión, entre otros.

En la literatura especializada sin lugar a dudas el producto de panadería más estudiado, tanto desde el punto de vista fenomenológico como también desde el modelado matemático, ha sido el pan (Thorvaldsson y Janestad, 1999; Therdthai y col., 2002; Zhang y Datta, 2006; Lucas y col., 2007; Jefferson y col., 2007; Wagner y col., 2007; Purlis y Salvadori, 2009b, 2010; Purlis, 2011, 2012; Bikard y col. 2012; Ploteau y col., 2012). Respecto a panificados dulces, encontramos que el tema ha adquirido relevancia en la última década. Lostie y col. (2004) propusieron un modelo de variables de estado para simular la transferencia de calor y de vapor de agua en el interior de bizcochuelo durante el período de transición corteza/miga. El modelo reproduce los perfiles experimentales de temperatura en la corteza y en la miga y la evolución de espesor de corteza. Sosa-Morales y col. (2004) utilizaron las soluciones analíticas de transferencia de calor y masa, con propiedades constantes, para simular el prehorneado y la etapa final de horneado de galletitas precocidas y precongeladas, considerando geometría cilíndrica. Hadiyanto y col. (2007) simularon el horneado de pan, galletitas y bizcochuelo. El modelo considera la transferencia de calor y materia, transformaciones debidas a la gelatinización del almidón y el desarrollo de atributos de calidad como color junto con propiedades de textura. En trabajos sucesivos, Sakin-Yilmazer y col. (2007a, 2007b, 2012) desarrollaron un modelo numérico para resolver las transferencias simultáneas de calor y materia durante el horneado de panificados dulces, utilizando la misma formulación horneada en distintas geometrías: bizcochuelo de poco espesor, cupcake y un molde savarín o corona. El modelo matemático consideraba las leyes de Fourier y Fick, geometrías regulares sin cambio de volumen y fue resuelto mediante un esquema de diferencias finitas en Fortran 95, logrando reproducir los perfiles de temperatura y contenido de humedad promedio del producto. Ferrari y col. (2012) plantearon los balances simultáneos de energía y materia, contemplando la

evaporación superficial y la formación de la corteza, durante el horneado de galletitas en un horno eléctrico de convección natural, operando a 180°C. El problema fue resuelto para una geometría bidimensional utilizando elementos finitos y propiedades térmicas definidas por funciones continuas dependientes de la temperatura y contenido de humedad del producto. El modelo logró reproducir con fidelidad los perfiles de temperatura, no así los perfiles de contenido de humedad, los autores atribuyeron esto a que se subestimó la importancia del molde como barrera a la evaporación de agua. Andresen (2013) formuló un modelo matemático de la transferencia de energía y materia durante el horneado de galletitas de manteca. El modelo fue resuelto numéricamente utilizando el método de elementos finitos, y validado mediante información experimental, concluyendo que éste logró reproducir de modo adecuado ambos mecanismos.

Para el presente trabajo, el modelo propuesto se centra en la simulación de la transferencia de energía. La solución del mismo permitirá predecir la evolución de la temperatura interna durante el horneado de ambos productos estudiados, y como variable derivada del perfil de temperatura, el tiempo de cocción.

La transferencia de materia es apreciable cerca de la superficie, donde se observa la formación de una corteza superficial deshidratada, de pequeño espesor. El resto del volumen no presenta grandes cambios en su contenido de humedad. Al no resolver el balance de materia el modelo propuesto no predice el contenido de humedad interna ni el espesor de la corteza superficial.

Sin embargo en la solución del balance de energía no se desprecia la evaporación superficial, sino que este fenómeno se incorpora a través de las propiedades térmicas (que se detallan en la sección siguiente) y así tanto el perfil de temperatura como el tiempo de cocción quedan afectados por la evaporación de agua.

Como dominio de simulación (Ω) o volumen de control se considera un cuerpo homogéneo y continuo (sin considerar la matriz porosa característica de estos productos) que se expande durante el tiempo de procesamiento.

De esta manera el balance de energía, en su forma más simple en el dominio de simulación, Ω , es el siguiente:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T), \forall \Omega, \quad t \geq 0 \quad (2.2)$$

El miembro derecho de la igualdad en la ecuación 2.2 expresa el calor transferido por conducción según la ley de Fourier.

En la superficie del producto (Π) se considera transferencia de calor por convección (y eventualmente radiación) usando un coeficiente de transferencia de energía, dependiente de la

temperatura y de la velocidad del aire en el interior de la cámara de cocción. De esta manera la condición de contorno queda expresada como sigue:

$$\nabla(k\nabla T) = h_c (T_{\text{horno}} - T), \quad \forall \Pi \quad (2.3)$$

En las ecuaciones 2.2 y 2.3 ρ , C_p y k son la densidad (kg m^{-3}), el calor específico ($\text{J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$) y la conductividad térmica ($\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) del producto, respectivamente, $T(\text{°C})$ es la temperatura en el interior del producto, T_{horno} la temperatura en la cámara del horno (°C), t (s) el tiempo y h_c ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$) el coeficiente de transferencia de calor.

El miembro derecho de la igualdad en la ecuación 2.3 expresa el calor transferido por convección de acuerdo a la ley de Newton de calentamiento (el flujo de calor por unidad de área es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie del producto y el aire caliente de la cámara de cocción).

En consecuencia, para ambos mecanismos de transferencia de calor, conducción y convección, la temperatura juega un rol fundamental. En conducción, el gradiente de temperatura interna es la fuerza impulsora, mientras que en convección lo es la diferencia de temperatura entre la superficie del producto y el ambiente.

2.3.1 Propiedades térmicas

Para incorporar al modelo numérico las propiedades termofísicas se recurrió a expresiones de bibliografía, determinadas en procesos y/o productos similares a los de esta tesis, las que fueron adaptadas en base a resultados de nuestros ensayos.

De acuerdo a su definición, la densidad global del producto es la cantidad de masa por unidad de volumen. Como se mencionó previamente, el incremento de volumen es un factor importante dentro del conjunto de cambios y transformaciones que ocurren durante el horneado de este tipo de productos. Este aumento de volumen y, en menor medida la pérdida de peso global, afectan directamente el valor de la densidad global del producto.

Experimentalmente se determinó la densidad global inicial (ρ_0 , mezcla inicial) y final (ρ_f , producto horneado) de cada producto para cada condición ensayada (más detalles en la sección 2.4.4.2). A su vez, Baik y col. (1999) calculan las propiedades térmicas de un producto muy similar a los estudiados en la presente tesis (cupcakes) simulando el proceso de horneado industrial. Particularmente, estos autores encontraron, a partir de sus valores experimentales, que la densidad desciende linealmente hasta estabilizarse en un valor final. El instante en el cual se estabiliza coincide con el instante en el cual la temperatura interna se estabiliza alrededor de los 100°C . Teniendo en cuenta este antecedente y nuestros valores experimentales de densidad global, en este trabajo se estimó la densidad ($\rho, \text{kg m}^{-3}$) como función de la

temperatura interna según la ecuación 2.4, donde las constantes ρ_0 , b y ρ_f se ajustan para cada producto, madalena y bizcochuelo respectivamente, y T (°C) es la temperatura interna.

$$\rho = \begin{cases} \rho_0 - b T & T < 100 \\ \rho_f & T \geq 100 \end{cases} \quad (2.4)$$

En la expresión del calor específico (C_p , J kg⁻¹°C⁻¹), se adopta el enfoque de Bonacina y col. (1973) ampliamente utilizado en el modelado de problemas similares de transferencia de energía con cambio de fase (tanto evaporación de agua en cocción como solidificación de agua en congelación). Ambos aportes (calor latente y calor sensible) se suman:

$$C_p = C_{p_sen} + C_{p_lat} \quad (2.5)$$

$$C_{p_sen} = \sum x_i C_{pi} \quad (2.6)$$

$$C_{p_lat} = \frac{\Delta H_{vap} m_{agua}}{\Delta T} \quad (2.7)$$

El calor sensible, C_{p_sen} (ecuación 2.6) se calcula en base a la composición inicial de la mezcla según el modelo de Choi y Okos (1986); donde x_i es la fracción en masa de cada componente, según la composición presentada en las tablas 2.1 y 2.2 para cada producto; $C_{p_agua} = 4180$; $C_{p_CH} = 1547$; $C_{p_prot} = 1711$; $C_{p_lip} = 1928$; $C_{p_cenizas} = 908$ (fibras y minerales); estos valores se asumieron constantes, expresados en J kg⁻¹°C⁻¹. En el término de calor latente C_{p_lat} (ecuación 2.7) ΔH_{vap} es la entalpía de vaporización del agua pura (2257000 J kg⁻¹), m_{agua} es la cantidad promedio de agua evaporada durante el horneado (kg) y ΔT es el intervalo de temperaturas en el que se asume que se produce el cambio de fase (se adopta un valor de 5°C). Así, a través del calor específico aparente (ecuación 2.5) se incorpora la evaporación superficial, que da origen a la formación de la corteza deshidratada.

La conductividad térmica (k , W m⁻¹°C⁻¹) fue evaluada según datos de bibliografía, determinados para panes y productos panificados (Rask, 1989), considerando que a temperaturas menores a 100°C la conductividad crece suavemente, y a temperaturas mayores a 100 °C su valor decrece bruscamente: el agua se evapora y los poros internos de la miga son ocupados por aire. Así, k viene representada por la ecuación 2.8. El valor k_0 se ajustó para cada producto en particular, teniendo en cuenta el contenido de agua inicial de madalena y bizcochuelo respectivamente.

$$k = \begin{cases} k_0 + 0.18 \cdot 10^{-2} T & T < 100 \\ 0.2 & T \geq 100 \end{cases} \quad (2.8)$$

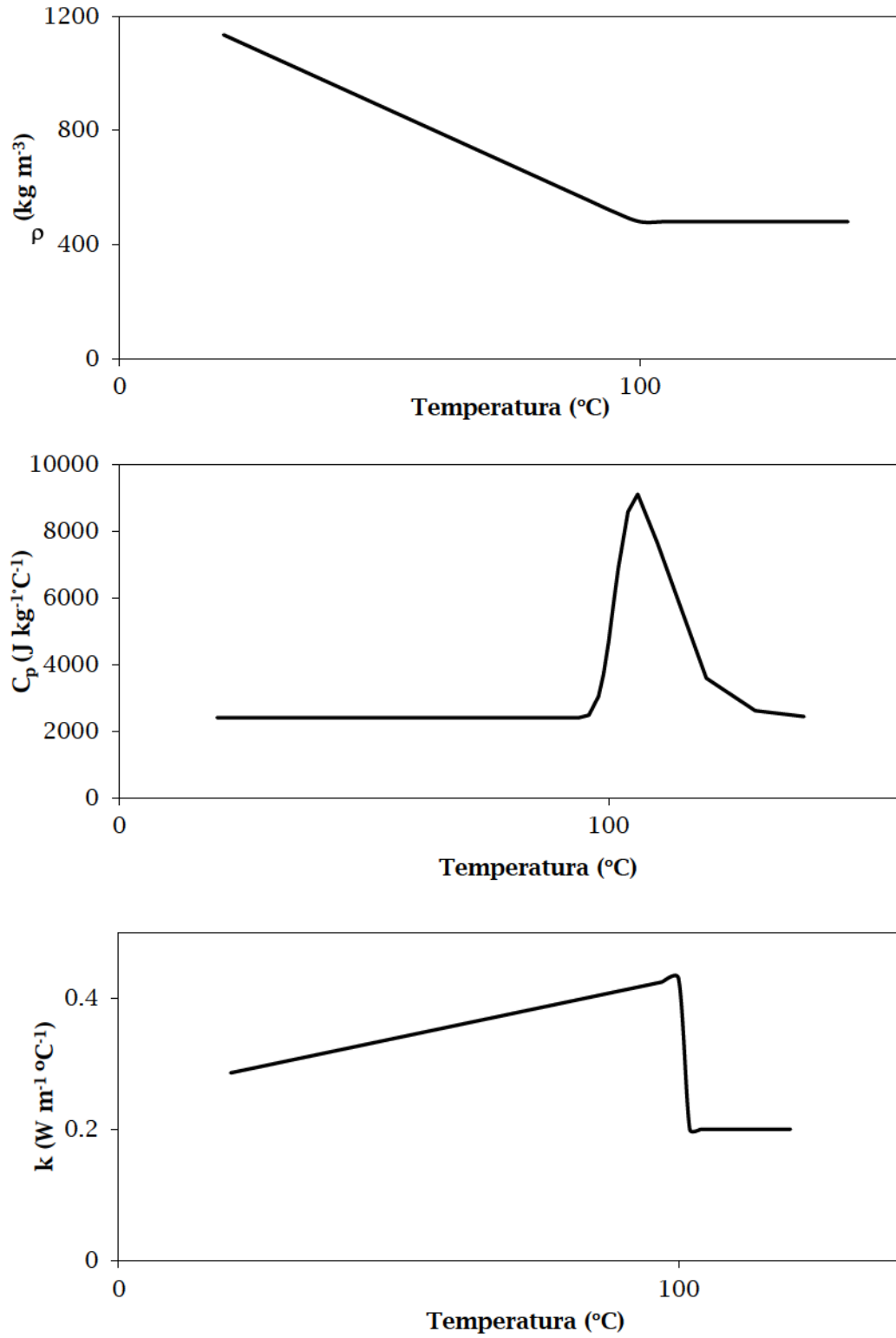


Figura 2.9. Variación de las propiedades termofísicas empleadas en el modelo.

En todas las expresiones anteriores, el cambio de fase produce una discontinuidad, alrededor de la temperatura de cambio de fase, valor que se consideró igual a 100°C. Para evitar dificultades en la solución numérica, estas funciones fueron suavizadas con funciones de tipo Heaviside, utilizando el software OriginPro 8 (Ferrari y col., 2012). De modo genérico, a fin de ilustrar la variación de estas propiedades, la figura 2.9 esquematiza la dependencia de cada una de ellas con la temperatura del producto.

El coeficiente de transferencia de calor h_c fue calculado promediando valores teóricos y valores medidos en experiencias de horneado empleando un sensor de flujo de calor (Omega HFS4, EEUU).

En primer lugar, la medida experimental se realizó sobre la mitad de una madalena precocida (corte transversal) colocando el sensor sobre la superficie de la misma (miga). Los ensayos se realizaron a T_{horno} igual a 100 °C y a 130 °C debido a limitaciones propias del sensor, el cual no soporta temperaturas mayores a 140 °C. Estos ensayos permitieron conocer el rango de valores de h_c de cada equipo y a su vez, la influencia real de la temperatura sobre este parámetro.

Dado el rango de T_{horno} de trabajo del sensor, para incorporar al modelo numérico se calcularon valores teóricos del coeficiente h_c , los que se compararon con las tendencias halladas experimentalmente.

En este sentido, se utilizaron correlaciones de bibliografía (Perry, 1997) desarrolladas para el flujo de calor alrededor de objetos sumergidos. Las mismas están expresadas a través del número adimensional Nusselt, el cual mide la relación entre la transferencia de calor por convección y por conducción entre un fluido y la superficie del objeto. Así, por definición:

$$Nu = \frac{L h_c}{k} \quad (2.9)$$

donde h_c ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$) es el coeficiente de transferencia de calor por convección, k la conductividad térmica del fluido ($\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) y L la longitud característica del objeto (m). Las correlaciones utilizadas son:

$$\text{CN: } Nu = 0.54 (Pr Gr)^{1/4} \quad (2.10)$$

$$\text{CF y CFH: } Nu = 0.648 (Re)^{1/2} (Pr)^{1/3} \quad (2.11)$$

donde Pr , Re y Gr son los números adimensionales de Prandtl, Reynolds y Grashoff, respectivamente. El primero es proporcional al cociente entre la difusividad de momento (viscosidad cinemática) y la difusividad térmica, el mismo se calcula con propiedades termofísicas del medio, en nuestro caso aire seco (CN y CF) y aire húmedo (CFH); el número de

Reynolds (Re) es utilizado para caracterizar el movimiento del fluido en convección forzada y finalmente, Gr relaciona las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas que actúan en un fluido provocando su movimiento en convección natural.

En base a los valores calculados del coeficiente h_c (para cada condición operativa y cada producto estudiado), se determinaron los coeficientes de transferencia que se incorporaron al modelo numérico. Se adopta idéntico valor de h_c para toda la superficie de la muestra, sin distinción de superficie en contacto directo con el aire o en contacto con el molde, ya que al ser moldes metálicos de muy bajo espesor se considera que la resistencia a la transferencia de calor a través de sus paredes es despreciable.

2.3.2 Simulación numérica

De acuerdo a los balances establecidos previamente en las ecuaciones 2.2 y 2.3, queda definido el problema matemático a partir de ecuaciones diferenciales parciales. Si bien las soluciones analíticas suelen ser las más precisas, pueden ser muy complejas, resultando una mejor alternativa las soluciones numéricas. Las mismas son planteadas discretizando las ecuaciones diferenciales, que quedan planteadas como sistemas de ecuaciones de menor complejidad. Esta solución requiere que la geometría en la cual está planteado el problema (dominio) sea dividida en un determinado número de elementos de menor tamaño, en donde las ecuaciones diferenciales pueden ser aproximadas por diferencias definidas por la longitud característica del elemento (Zienkiewicz y Taylor, 1994).

En el presente trabajo, el modelo matemático se resolvió por el método de elementos finitos, utilizando el software comercial COMSOL Multiphysics 3.4, el cual permite acoplar y resolver en forma conjunta fenómenos físicos simultáneos.

El método de elementos finitos (MEF) es una de las técnicas numéricas comúnmente empleadas para resolver ecuaciones diferenciales parciales. Este permite modelar regiones irregulares bi y tridimensionales con mejor precisión que otros métodos, por ejemplo diferencias finitas (Andresen, 2013). Por esta razón ha sido empleado ampliamente en la resolución de problemas en distintas áreas de aplicación: ingeniería mecánica y de materiales, ingeniería química, aeronáutica e hidráulica, física, geofísica entre otras. Particularmente en cuanto a la tecnología de alimentos, se encuentran numerosos antecedentes que utilizan esta herramienta en la solución de problemas de calentamiento/enfriamiento, congelación/descongelación y transferencia de calor y materia en general (Goñi y Salvadori, 2010; Santos y col., 2010; Ferrari y col., 2012; Feyissa y col., 2013).

Los fundamentos del MEF se basan en plantear las ecuaciones diferenciales parciales correspondientes a los balances de conservación y las condiciones de contorno en el dominio de simulación o volumen de control. Luego, a partir de una discretización espacial por

elementos finitos la geometría es dividida en un número de pequeños elementos conectados por nodos y por el método lineal se obtiene la forma débil o variacional del problema original a resolver (en cada elemento la ecuación que gobierna el problema es aproximada a un polinomio).

La formulación débil se resuelve luego por una técnica de residuos ponderados, como el método Galerkin o ubicación equi-distante (Zienkiewicz y Taylor, 1994) que demuestra que la solución a este problema es también solución del problema original. Las ecuaciones que resultan de aplicar el método son usualmente más complejas y numéricamente más intensivas que otros métodos, pero esto no es una restricción actualmente, dado que se cuenta con paquetes comerciales donde el usuario dispone de la herramienta, y a través de una interfaz gráfica puede plantear la resolución de un problema determinado, sin necesitar un conocimiento profundo de la técnica de resolución numérica.

En la práctica se trabajó en COMSOL Multiphysics 3.4 acoplado con el programa MATLAB 7.8.0 de manera de poder introducir las propiedades térmicas definidas por funciones más complejas de tipo Heaviside. El software utilizado emplea un esquema de integración implícito con paso de tiempo variable, combinado con el método de Newton para resolver el sistema de ecuaciones no lineales resultante.

El problema fue resuelto utilizando los módulos que se encuentran en la biblioteca de modelos de problemas de COMSOL, integrando el módulo de transferencia de calor por conducción *ChemicalEngineeringModule/Energytransport/Conduction/Transientanalysis* (el cual permite considerar el aporte de calor convectivo como condición de contorno), junto con el módulo que permite considerar el desplazamiento de la malla del volumen de control: *COMSOLMultiphysicsModule/DeformedMesh/Movingmesh (ALE)/ Transientanalysis*. En ambos se selecciona el análisis en estado transitorio, para encontrar soluciones en función del tiempo.

2.3.2.1 Dominio de simulación

El primer paso para utilizar esta herramienta de modelado consiste en definir el volumen de control, es decir, el dominio de simulación. Considerando las características geométricas de ambos productos, y suponiendo que la transferencia de energía es uniforme en las superficies laterales, dirigida hacia el centro de la muestra, se propone una geometría bidimensional, axisimétrica respecto al eje central (Zhang y Datta, 2006; Andresen, 2013), que queda definida por las coordenadas r y z . La misma fue construida con las herramientas de dibujo de COMSOL respetando las dimensiones iniciales de cada producto (figura 2.10).

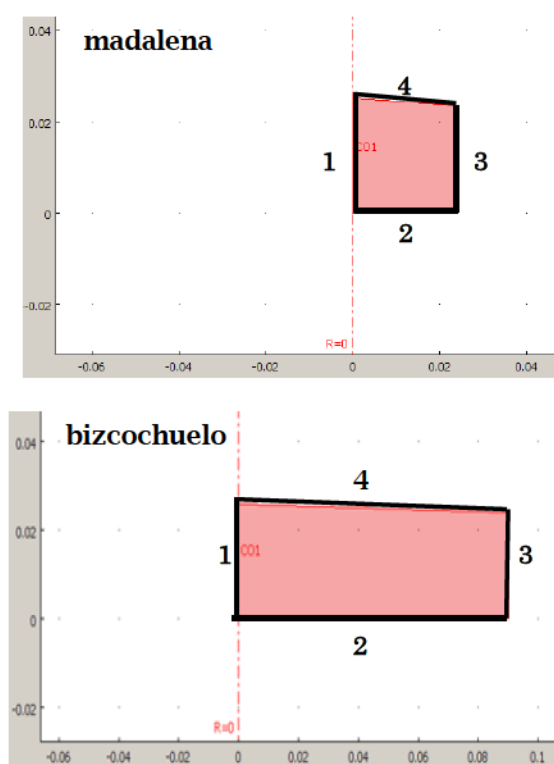


Figura 2.10. Geometría definida en la interface gráfica de COMSOL para madalena y bizcochuelo.

Si bien el software permite obtener el sólido en 3D por revolución alrededor de un eje de simetría, esto aumenta considerablemente el tiempo de cálculo y no se justifica ya que la solución 2D brinda los resultados requeridos.

Previamente se mencionó el incremento de volumen que se observa en estos productos durante el proceso de horneado. De este modo, resulta de interés incorporar este fenómeno al modelo matemático de cocción. En literatura se encuentran algunos antecedentes: Zaroni y col.(1994) incorporaron la variación del volumen del pan, determinada en forma experimental, al modelo realizado por diferencias finitas. Por su parte, de Cindio y Carrera (1995) desarrollaron un modelo matemático para simular las tres etapas típicas de procesamiento de pan: formación de la masa, levado y horneado. Los autores asumieron un comportamiento viscoelástico lineal del producto para caracterizar las propiedades reológicas del mismo y a su vez, para explicar y cuantificar el desarrollo de poros y la expansión de la masa. En el modelado de la cocción de bizcochuelo, Lostie y col. (2002b, 2004) incluyeron la expansión y contracción de volumen mediante una relación entre la velocidad de expansión y la sobrepresión en el interior del mismo.

Si bien no se conocen en profundidad los mecanismos que gobiernan este crecimiento de volumen para incorporarlos al modelo mediante los balances de conservación respectivos, en el

presente trabajo se realizaron ensayos experimentales siguiendo este fenómeno (sección 2.2.4). Además, la herramienta matemática utilizada en la simulación numérica nos permitió considerar la deformación de la malla que representa a la muestra (dominio de simulación) utilizando el método arbitrario de Lagrange-Euler (ALE), de manera tal de perturbar los nodos de la malla para que se correspondan con los bordes desplazados.

La discretización espacial inicial de la malla de elementos finitos fue realizada con el método de mallado normal, utilizando elementos triangulares. Si bien el software brinda la posibilidad de refinar el mallado de modo de obtener más nodos de cálculo (mayor número de elementos finitos), y así obtener una mejor aproximación a la solución, en este nuestro caso, simulaciones preliminares del modelo demostraron que no se obtenían diferencias significativas en la solución. Por el contrario, esta opción demandaba mucho tiempo de cálculo haciendo menos eficiente la tarea.

La deformación de la malla fue resuelta asignando de manera prescripta una velocidad de desplazamiento a la superficie superior del dominio de simulación. Solo se consideró el movimiento de esta superficie, ya que el resto de los bordes de la muestra (en ambos productos) están contenidos por el molde. Los valores numéricos de la velocidad de desplazamiento son las derivadas respecto del tiempo de las funciones de evolución de altura h (m), ajustadas a partir de los datos experimentales de expansión volumétrica.

Teniendo en cuenta lo detallado previamente sobre el modelo y respetando la numeración asignada a los límites del dominio de simulación (figura 2.10) se detallan a continuación las condiciones de contorno del mismo para la resolución numérica del modelo propuesto:

1: eje de simetría

$$\begin{aligned}
 &2 \text{ y } 3: \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de desplazamiento nula, } v_r = 0; v_z = 0 \\ \text{flujo de calor: coeficiente de transferencia convectivo, } \quad (W \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}), \end{array} \right. \\
 &4: \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de desplazamiento } v_r = 0; v_z = f(r, t) \text{ ajustada a partir de datos} \\ \text{experimentales} \\ \text{flujo de calor: coeficiente de transferencia convectivo, } \quad (W \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}), \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

2.3.2.2 Validación

Todo modelo matemático necesita una etapa de validación con datos experimentales, para verificar los resultados predichos. En este caso la validación se efectuó comparando temperaturas predichas con los datos obtenidos experimentalmente, en una o más posiciones del interior de las muestras. El software utilizado permite, entre las distintas alternativas de

postprocesamiento, exportar a un archivo los resultados (por ej, la temperatura en determinados nodos).

Entonces, para analizar la bondad de la simulación se estimó el error relativo o absoluto porcentual, ε %, entre valores experimentales y valores calculados, según la ecuación 2.12:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|V_{exp} - V_{pred}|}{V_{exp}} \right) 100 \quad (2.12)$$

donde n es el número de datos, V_{exp} es el valor experimental y V_{pred} es el valor predicho por el modelo. Del modo en que fue planteado el modelo, dichos valores serán temperatura ($^{\circ}\text{C}$) o tiempo (s).

2.4 Determinación de parámetros de calidad a través de técnicas instrumentales

Como se mencionó previamente, el proceso de horneado genera interacciones complejas en el interior del producto como consecuencia de numerosas reacciones químicas y físicas. Debido a esto, es un proceso dinámico en donde el producto final, específicamente su calidad, es resultado de la combinación de todas estas interacciones. Como consecuencia no es una tarea sencilla estudiar cada reacción y las interacciones entre las mismas que ocurren en tiempo real de proceso.

Sin embargo, en los últimos años varios autores han estudiado y vinculado la influencia de las condiciones del proceso de horneado con la calidad de distintos productos de panadería. Broyart y col. (1998) midieron la evolución del color (medido mediante un colorímetro) durante el horneado de galletas saladas. Realizaron un desarrollo de un modelo cinético de variación de luminosidad en función de la temperatura y el contenido de humedad de las muestras. Baik y col. (2000b) analizaron distintos indicadores de calidad: contenido de humedad, densidad, pH, color superficial, textura durante la cocción de tortas en un horno industrial de túnel para complementar un trabajo previo en donde se había diseñado el proceso de cocción. Lostie y col. (2002a) estudiaron, por técnicas de procesamiento de imágenes, la evolución de la textura durante el horneado de bizcochuelos. Sumnu y col. (2000, 2005), y Turabi y col. (2008), se enfocaron en la optimización del horneado de tortas de arroz en equipos que combinan microondas y radiación infrarroja, teniendo en cuenta la pérdida de peso, volumen específico, firmeza y color.

En el presente trabajo, para ambos productos estudiados (madalena y bizcochuelo) se propone el seguimiento a lo largo del proceso de horneado del color superficial, la pérdida de peso, y el contenido de humedad, tanto de la miga como de la corteza. Debido a limitaciones tecnológicas el seguimiento del contenido de humedad y del color superficial no se realizó de modo continuo, sino con experiencias de horneado parciales. El estudio se completa con la

determinación de otros parámetros de calidad en el producto final: el espesor de corteza, la relación corteza/miga, la densidad global, la porosidad, la densidad y la textura (firmeza, cohesividad, gomosidad y elasticidad) de la miga.

2.4.1 Evolución de color superficial

De los distintos atributos de calidad de los productos panificados, el color superficial resulta primordial, debido a que la apariencia afecta directamente la primera impresión del consumidor, resultando así un factor decisivo de compra. El color superficial es el resultado combinado de las reacciones de pardeamiento: caramelización de azúcares y reacción de Maillard.

En este trabajo se realizó un seguimiento del desarrollo del color de la corteza de las muestras durante el proceso de cocción. Este parámetro fue medido utilizando un colorímetro tri-estímulo (Minolta CR-300, Japón), el cual registra color de acuerdo al sistema CIE $L^*a^*b^*$ (L^* -luminosidad, a^* -intensidad de verde-rojo, b^* -intensidad de azul-amarillo). Para analizar el desarrollo del pardeamiento, se realizaron experiencias de horneado parcial, de acuerdo a la metodología propuesta por Broyart y col. (1998). Así se registraron los valores al inicio del proceso, al instante identificado como inicio de la formación de corteza, a varios instantes intermedios y por último, dos o tres instancias finales, donde la muestra ya mostraba una apariencia quemada. En suma, se realizaron un total de nueve medidas para madalena y siete para bizcochuelo, por cada condición de horneado ensayada. En estas instancias elegidas para el monitoreo, las muestras eran retiradas del horno y una vez medido el color, eran descartadas. Cada valor informado es el promedio de quince lecturas (tres lecturas por muestra, cinco muestras por ensayo) en madalena y de ocho lecturas en bizcochuelo (una muestra por ensayo).

El parámetro seleccionado para evaluar la cinética de desarrollo de color superficial es un índice de pardeamiento o Browning Index, BI (ecuación 2.13), ya que representa la pureza de color marrón en alimentos donde ocurre pardeamiento enzimático y no enzimático (Buera y col., 1986):

$$BI = \frac{100(x - 0.31)}{0.17} \quad (2.13)$$

donde

$$x = \frac{(a + 1.75 L)}{5.645 L + a - 3.012 b}$$

Si bien este índice fue desarrollado para representar el pardeamiento de sistemas líquidos, fue utilizado satisfactoriamente para evaluar la variación de color en productos panificados dulces tales como galletitas (Kemerliy col., 2011) y muffins (Sakin-Yilmazery col., 2013).

2.4.2 Pérdida de peso

La pérdida de peso brinda información directa del aprovechamiento de la materia prima, es decir del rendimiento en masa del producto al ser transformado durante el proceso de cocción. Este parámetro, a su vez, está estrechamente relacionado con la transferencia de energía hacia el interior del producto durante el proceso, la cual induce el transporte de agua hacia el exterior, provocando un cambio en la distribución de humedad del producto durante el horneado (Wagner y col., 2007).

De modo de estudiar la evolución de esta variable durante el proceso, se monitoreó el peso del producto. Asumiendo que la disminución de peso es debida exclusivamente a la deshidratación del producto, se calculó el contenido de agua en base seca, X ($g_{\text{agua}} g_{\text{SS}}^{-1}$, ecuación 2.14):

$$X = \frac{(x_{\text{agua},0} W_0) - (W_0 - W_t)}{W_0 - (x_{\text{agua},0} W_0)} \quad (2.14)$$

donde W_0 y W_t son el peso inicial y a tiempo t del producto (g) y $x_{\text{agua},0}$ es la fracción inicial en peso de agua (en base húmeda).

En los ensayos en el modo convección forzada (CF) se registró el peso mediante la balanza incorporada al horno (figura 2.4), con lecturas cada 30 s, lo cual permitió un buen seguimiento de la curva de pérdida de peso, sin retirar las muestras del horno. Sin embargo esta metodología presenta una serie de complicaciones prácticas. La utilización de la balanza on-line requiere la interrupción del funcionamiento del ventilador del horno (la alta velocidad de circulación de aire provoca vibraciones que dificultan la estabilización de la lectura), y por características inherentes al diseño del equipo, al apagar el ventilador se apagan las resistencias calefactoras. De este modo se interrumpe el funcionamiento del horno por unos segundos, los que requiera la estabilización del valor de peso y su lectura.

En consecuencia, para el resto de los ensayos tanto en el equipo Multiequip como en el horno Ariston, que no está provisto de celdas de carga, se decidió aprovechar los ensayos de horneado parcial descriptos en la sección anterior para el monitoreo de color. Así, en los ensayos parciales mencionados, las muestras eran retiradas del horno, se pesaban, utilizando una balanza analítica (Denver Instruments XE-4100, EEUU), y por último se medía color.

Finalmente, para analizar cada condición de proceso en términos de rendimiento másico, se calculó la pérdida de peso porcentual WL (%), definida como la diferencia entre el peso inicial W_0 y el peso final W_f , según la ecuación 2.15:

$$WL = \frac{(W_0 - W_f)}{W_0} 100 \quad (2.15)$$

2.4.3 Análisis de la corteza y de la miga

Desde los instantes iniciales del horneado, se produce evaporación de agua en las regiones que alcanzan temperaturas elevadas rápidamente, absorbiendo calor latente de vaporización. El vapor es difundido por los poros interconectados del producto hacia la superficie, gracias a la influencia del gradiente de concentración de vapor. En simultáneo se forma un gradiente de agua líquida el cual provoca la transferencia de agua desde el interior hacia la superficie. Debido a que el flujo difusivo de agua líquida desde el centro es más lento que el flujo de vapor en la superficie, se genera una zona deshidratada en la superficie, la cual incrementa su espesor a medida que transcurre el proceso de horneado (Wagner y col., 2007). Como consecuencia de este mecanismo, se diferencian en el producto dos zonas: la miga (zona interna, húmeda) y la corteza (zona externa, deshidratada). Particularmente para ambos productos panificados estudiados en este trabajo, se busca que la corteza presente un espesor reducido, y con un contenido de humedad que, si bien menor que el de la miga interior, no tan bajo como el de la corteza de pan.

2.4.3.1 Contenido de humedad

En ambos productos, se determinó el contenido de humedad de las dos regiones características (figura 2.11): miga y corteza en cinco instantes del horneado: al inicio (humedad de la mezcla), a 0.25, 0.5 y 0.75 del tiempo total (realizando ensayos de horneados parciales) y al final del proceso. La corteza, la cual es de muy bajo espesor en la etapa inicial de horneado, fue removida cuidadosamente utilizando un bisturí. El contenido de humedad fue determinado por secado en estufa convectiva (Dalvo Instrumentos Upf343, Argentina) de acuerdo al método AOAC 925.09 (AOAC, 1995), colocando entre 3 a 5 g de muestra aproximadamente, en estufa a 105°C, hasta alcanzar peso constante, medido con una balanza analítica (Ohaus Adventurer AR2140, EEUU). El contenido de humedad se expresa en base húmeda.

Este ensayo, monitoreando la humedad de ambas regiones con el tiempo de proceso, fue realizado únicamente en la condición de menor temperatura nominal en el modo convección natural (CN1), debido a que la menor velocidad de desarrollo de la corteza superficial permite

trabajar con mayor precisión. Con la misma técnica, se separó la corteza de ambos productos al final del proceso para todas las condiciones ensayadas, y se determinó el contenido de humedad de las dos regiones (corteza y miga). Los resultados presentados son el promedio de cuatro determinaciones.

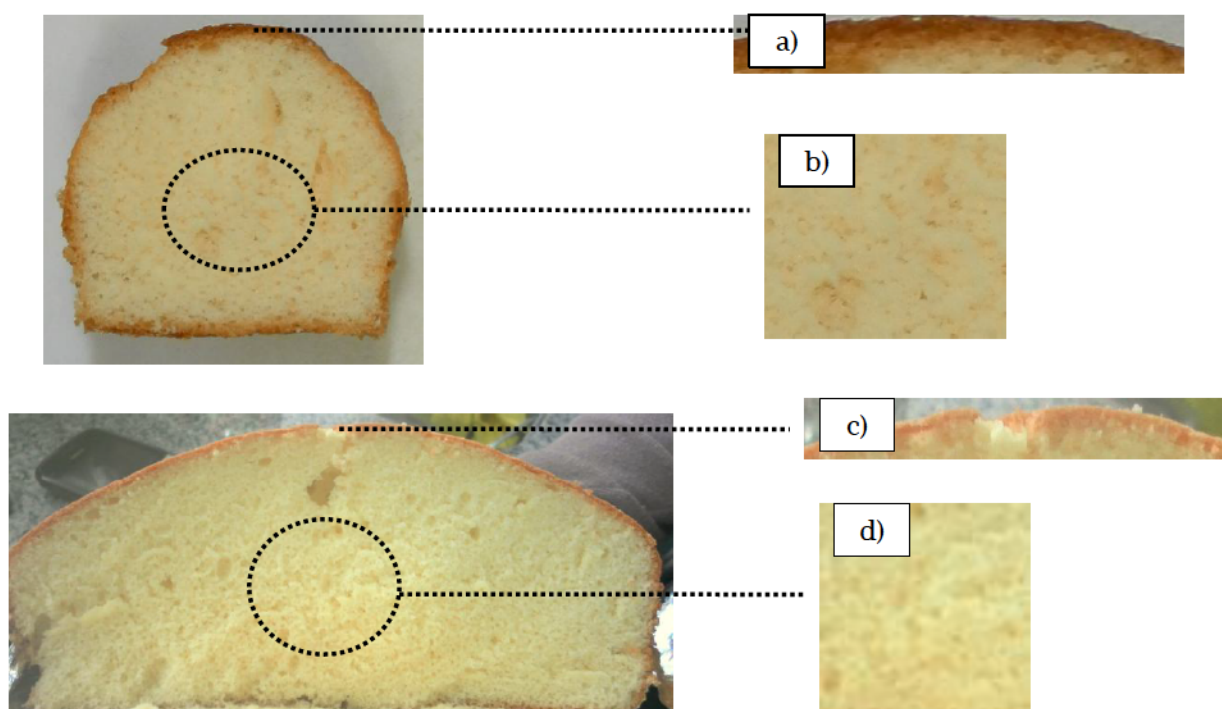


Figura 2.11. Imágenes ilustrativas del procedimiento de corte de muestras para determinar humedad a) corteza de madalena (ampliada x15); b) miga de madalena; c) corteza de bizcochuelo (ampliada x10); d) miga de bizcochuelo.

2.4.3.2 Relación corteza/miga

Como se mencionó previamente, la corteza característica de este tipo de productos se forma durante el proceso de horneado tomando un color considerablemente más oscuro y de menor humedad que la miga. El desarrollo de la misma le confiere características texturales que determinan si la calidad final del producto es la adecuada (Cauvain, 2004).

La relación corteza/miga fue calculada de acuerdo a la técnica propuesta por Le-Bail y col. (2011) considerando que la corteza es la zona deshidratada de la superficie superior del producto de color más oscuro (figura 2.11). Para realizar las medidas las muestras fueron retiradas del horno respectivo y se dejaron enfriar cinco minutos, la corteza fue separada de la miga utilizando un bisturí (Vanin y col., 2009). La relación corteza/miga es expresada como

relación másica peso en peso (g corteza/g miga). Esta medida se realizó por cuadruplicado para cada condición de horneado para cada producto estudiado.

2.4.3.3 Espesor de corteza

Para cuantificar el espesor de corteza de los productos ensayados en el presente trabajo de tesis, se recurrió a un método no destructivo de análisis de imagen empleando ultrasonido de baja intensidad, más conocido como ecografía (Kossoff, 2000).

Aunque la aplicación de esta técnica está ampliamente desarrollada en el campo de la medicina, en el área de alimentos resulta un método eficaz y confiable para estimar la composición y calidad de la carne en animales vivos (Guitou y col., 2007). La aplicación práctica de esta técnica se ha difundido en los últimos tiempos sobre todo debido a los grandes avances en cuanto a la portabilidad y la resolución de imagen de la nueva generación de ecógrafos, sumado a la disponibilidad de software de análisis de imágenes.

En términos generales la técnica consiste en la emisión de ondas sonoras de alta frecuencia emitidas a través de un transductor hacia el área del cuerpo en estudio. El transductor recoge el eco de diferentes amplitudes que se genera al rebotar la onda sonora en los diversos tejidos y estructuras que componen el objeto. Las señales son procesadas por un software dando como resultado imágenes de los tejidos examinados en donde se puede diferenciar claramente la forma y tamaño de cada estructura, así como sus diferentes componentes.



Figura 2.12. Ecógrafo utilizado para las determinaciones de espesores de corteza.

En este trabajo se empleó un ecógrafo portátil (MindrayDP-2200, China), con transductor lineal de 17 cm regulado a 3.5Mhz (figura 2.12). Luego de treinta minutos de finalizada la cocción de las muestras, se realizaron los ensayos colocando el transductor sobre la superficie de cada muestra (madalena y bizcochuelo respectivamente), de la imagen adquirida se mide luego el espesor de la corteza.

Los resultados presentados son el promedio de cuatro determinaciones en madalena y dos en bizcochuelo, para todas las condiciones operativas ensayadas.

2.4.4 Propiedades estructurales

Muchos alimentos son estructuras compuestas por una matriz sólida porosa con un fluido asociado que ocupa los poros. Algunos son por naturaleza sólidos celulares y otros son procesados para serlo. Tal es el caso de los productos estudiados en este trabajo. Inicialmente, como consecuencia del batido de los ingredientes, partimos de una mezcla compleja compuesta por burbujas de gas como fase discontinua y, como fase continua, un complejo formado por huevo, azúcar y grasa en el cual están dispersas las partículas de harina (Shelke y col., 1990; Kocer y col., 2007). Como se mencionó anteriormente, durante el proceso de horneado esta mezcla fluida se transforma en una estructura alveolar, la miga. Las partículas de aire incorporadas durante el batido son transformadas en poros que quedan insertos en la estructura de la miga (Martínez-Cervera y col., 2012).

Como resultado obtenemos un sólido celular en el cual el fluido asociado es gaseoso, es por esto que los panificados en general se caracterizan por tener una densidad baja comparada con la de otros alimentos sólidos. En consecuencia, es de vital importancia estudiar la estructura interna de estos productos.

En este trabajo se han estudiado en conjunto la porosidad, la densidad (global y de miga) y la textura de la miga.

2.4.4.1 Porosidad de la miga

La porosidad de la miga (ϕ) se define como el número de poros por unidad de área.

En los últimos años se han desarrollado numerosas técnicas de análisis de imágenes para determinar distintas características de los alimentos entre otros, color, textura y porosidad. Particularmente, podemos mencionar varios trabajos que han utilizado estas técnicas para caracterizar la miga de productos similares a los estudiados en esta tesis. Roullié y col. (2005) y Lassoued y col. (2007, 2008) analizaron imágenes de la miga de pan obtenidas con escáner y luego procesaron las mismas aplicando métodos de dilatación y erosión que permitían aumentar/disminuir la intensidad y tamaño de las celdas en gris para obtener una nitidez

óptima. Gonzales-Barron y Butler (2006) realizaron una comparación de siete técnicas de filtrado y segmentación según el umbral del histograma (thresholding) de imágenes de pan elaborado con harina orgánica de modo de analizar la distribución y tamaño de poros. Estos mismos autores, Gonzales-Barron y Butler (2008) utilizaron imágenes escaneadas de miga de pan blanco proponiendo un procesamiento matemático de la imagen más complejo aplicando el concepto de fragmentación. Este método involucra sistemas matemáticos de alto grado y de complejidad geométrica los cuales permiten fragmentar el objeto imagen en geometrías más pequeñas las cuales pueden ser subdivididas en partes, donde cada una es (aproximadamente) una copia del todo.

En el presente trabajo, el número de poros fue medido por análisis de imágenes de acuerdo al siguiente procedimiento: la muestra horneada se divide en dos a través de su sección media transversal, y se obtienen imágenes de la miga con una cámara digital (Samsung ST60, Indonesia), con una resolución de 3264 x 2448 (8 M). Las imágenes son tomadas siempre a la misma distancia de la muestra (25 cm) colocando ésta sobre una superficie blanca en una habitación en la cual la intensidad de luz es constante y controlada. De esta manera se busca reducir las interferencias del ambiente sobre la imagen.

Las imágenes en primera instancia se transforman del sistema RGB a escala de grises, y luego a imágenes binarias, mediante las herramientas para el procesamiento de imágenes del programa Matlab 7.0 (Matlab, EEUU). Con este fin se desarrolló una secuencia siguiendo la misma técnica de thresholding propuesta por Gonzales-Barron y Butler (2006). El primer paso consiste en buscar un valor dentro del umbral del histograma de la imagen que sirva de referencia para el filtrado y la conversión de color a blanco o negro, utilizando la función *graythresh* (MatLab, EEUU), que emplea el método de Otsu (TheMathWorks, Inc) para computar un nivel dentro del umbral de grises que minimiza la variación de clases entre píxeles negros y blancos. Así matrices multidimensionales (imagen RGB) son convertidas a matrices 2 D.

En la práctica encontramos que esta función *graythresh* es una herramienta muy útil para estandarizar el procesamiento de todas las imágenes sin tener que analizar cada histograma en particular. Para mejorar la nitidez se afecta el valor absoluto por una constante (1.1) y luego este valor ($L=1.1*graythresh$) es utilizado como nivel de referencia en la conversión de la imagen RGB a binaria. Es decir, todos los píxeles de la imagen original por encima de este valor (L) son convertidos al valor de 1 (blanco), mientras el resto se transformen 0 (negro).

De acuerdo al nivel de referencia y a la resolución de la imagen original y de la pantalla, se conoce que las regiones que se convierten en regiones en negro son poros que tienen un área entre 0.2mm² y 35 mm². Dentro de este rango la técnica no permite distinguirlos distintos tamaños de poro.

Una vez convertidas, las imágenes binarias fueron procesadas con un editor de imágenes (Microsoft Picture Manager, EEUU) marcando un área de 2.8 cm², seleccionada aleatoriamente,

dentro de la cual se contabilizaron los poros manualmente. Este procedimiento se realizó por cuadruplicado (cuatro muestras) para cada condición de horneado y para cada producto. Finalmente, los resultados de porosidad se expresan en cm^2 .

2.4.4.2 Densidad global y densidad de miga

La densidad global (ρ) se midió como la relación entre el peso de una muestra entera y su volumen. Este último se cuantificó para las muestras de madalena por desplazamiento de volumen de semillas de acuerdo al método AACC10-05 (AACC, 2000) y para las muestras de bizcochuelo, teniendo en cuenta el tamaño y forma de las mismas, se calculó el volumen (V_b) como suma de un cilindro y medio elipsoide (ecuación 2.16). Las dimensiones del cilindro fueron definidas por la altura promedio del borde (h_b) y el radio del bizcochuelo (R), mientras que los semiejes del elipsoide fueron el radio del bizcochuelo (R) y la diferencia entre la altura total final registrada en el eje axial y la altura del borde de la muestra ($h_f - h_b$).

$$V_b = \pi R^2 h_b + \left(\frac{4}{3} \pi R^2 (h_f - h_b) \right) \quad (2.16)$$

Para estimar la densidad de miga (ρ_m) se utilizó el método propuesto por Cauvain (1991). En la práctica, se retiró con un sacabocado cilíndrico la región central del producto, de la cual fueron separados discos de aproximadamente 2.7 cm de diámetro y 1.5 cm de alto. El volumen de cada disco fue calculado con las dimensiones de diámetro y altura medidos con calibre.

Todas las determinaciones de densidad fueron realizadas en cuatro muestras distintas de cada producto y para cada condición operativa ensayada.

2.4.4.3 Textura

Definir métodos de cuantificación de las propiedades texturales en los productos panificados no es una tarea sencilla. Como primera aproximación a esta, se debe determinar cuáles son las características que hacen a la calidad y que varían considerablemente según cada producto en particular (Cauvain y Young, 2006).

Numerosos autores han trabajado en esta área con productos similares a los de la presente tesis, utilizando distintos parámetros que caracterizan la textura, fundamentalmente para evaluar la incidencia de diferentes formulaciones en la calidad de los productos. En este sentido, Shearer y col. (2005) realizaron determinaciones de firmeza y elasticidad para comparar muffins preparados con y sin harina de lino recientemente horneados. Gómez y col. (2007) evaluaron la textura de la miga de tortas preparadas con hidrocoloides mediante un análisis de perfil de textura (TPA) complementando sus estudios con ensayos de aceptabilidad

sensorial. Yadav y col. (2007) también recurrieron al ensayo TPA, para optimizar el horneado de chapati (torta hindú de harina), buscando un producto final de una textura aceptable y de una adecuada composición vitamínica. Vasantha-Rupasinghe y col. (2008) utilizaron la firmeza, entre otras características, para determinar la calidad textural de muffins elaborados con fibra extraída de cáscara de manzana. Turabi y col. (2008) propusieron optimizar el proceso de horneado bajo microondas de tortas de arroz. Para ello utilizaron ensayos de firmeza, entre otras determinaciones, de modo de caracterizar la calidad final del producto. Martínez-Cervera y col. (2011, 2012, 2013) utilizaron el ensayo de TPA en el estudio de la calidad de madalenas de menor contenido calórico.

En el presente trabajo, de manera de poder acercarnos a las principales características texturales de ambos productos estudiados, se emplearon dos tipos de ensayos: análisis de perfil de textura (TPA) y ensayo de relajación.

El ensayo de TPA, desarrollado en la década del '60 por un grupo de investigadores de General Foods Corporation, se ha difundido notablemente para la evaluación de alimentos sólidos y semisólidos (Szczeniak, 2002). Consiste en realizar una doble compresión a la muestra, de la respuesta se obtienen diferentes parámetros de textura, entre otros firmeza, cohesividad, consistencia, elasticidad, adhesividad, gomosidad y masticabilidad. La figura 2.13 muestra una curva generalizada de esta técnica.

En el presente trabajo, del análisis de perfil de textura se informan los siguientes parámetros:

Firmeza (N): fuerza máxima durante el primer ciclo de compresión.

Cohesividad (C): relación entre las áreas $\frac{\text{Area 2}}{\text{Area 1}}$.

Gomosidad (G): producto entre firmeza y cohesividad.

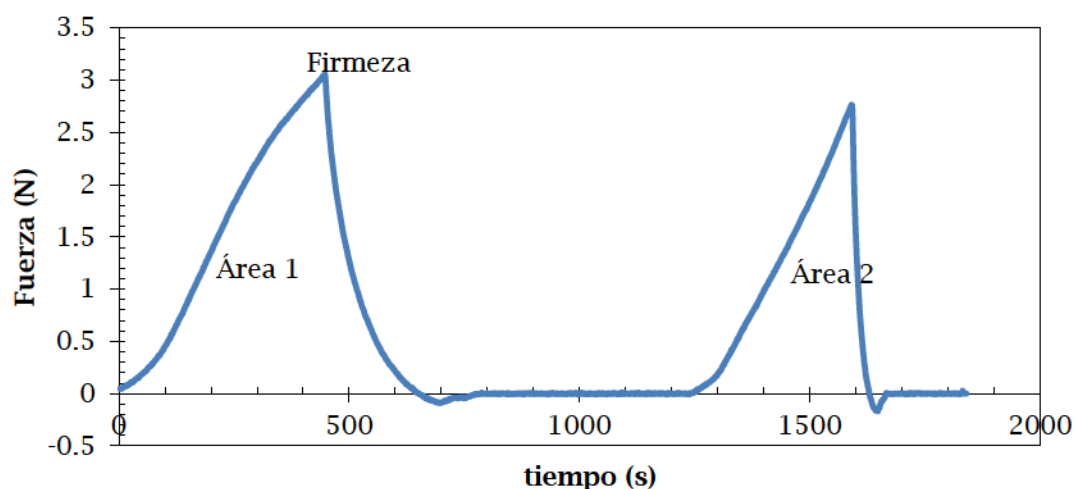


Figura 2.13. Curva típica obtenida del ensayo TPA.

Por otro lado, el ensayo de relajación consiste en someter a la muestra a una deformación constante durante un cierto tiempo, luego de alcanzada dicha deformación se registra la disminución del esfuerzo requerido (σ) con el tiempo (figura 2.14).

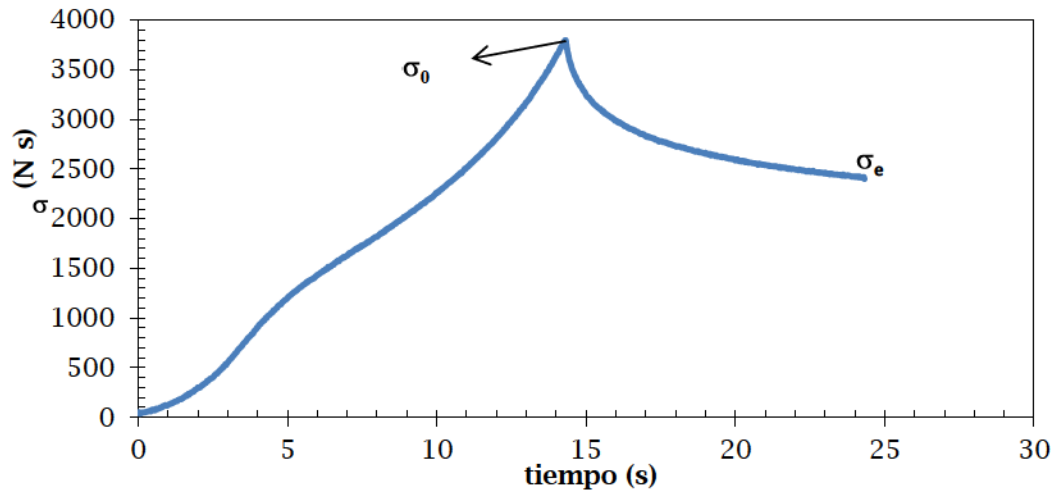


Figura 2.14. Curva de esfuerzo vs. tiempo típica del ensayo de relajación.

Para analizar este tipo de respuesta se suelen utilizar modelos mecánicos de manera de obtener información sobre el comportamiento viscoelástico de los alimentos. Estos modelos se construyen a partir de la combinación más o menos compleja de elementos sólidos de Hooke (H), representados por resortes y elementos viscosos (N) representados por sistemas émbolo-pistón (amortiguador). Uno de los modelos más utilizados es el propuesto por Maxwell, el cual representa el comportamiento de los materiales con un resorte y varios amortiguadores en serie (Olivera y Salvadori, 2006, 2009).

La variación del esfuerzo en función del tiempo puede ser expresada según el modelo de Maxwell por la ecuación 2.17:

$$\sigma = \sigma_d e^{-t/\lambda} + \sigma_e \quad (2.17)$$

donde $\sigma_d = \sigma_0 - \sigma_e$ es el esfuerzo de decaimiento, σ_e es el esfuerzo residual o de equilibrio, y λ es el tiempo necesario para que el esfuerzo alcance un valor igual a $0.375 \sigma_0$. Dado que la rapidez de recuperación del material frente a la deformación se asocia directamente con la elasticidad del mismo, en este trabajo, utilizaremos este tiempo característico λ para evaluar la elasticidad de las muestras.

Ambos ensayos (TPA y relajación) se realizaron utilizando un texturómetro TA.XT2i Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Reino Unido) equipado con un disco de aluminio de 75 mm de

diámetro (sonda P/75). Las experiencias se realizaron con cilindros de la miga del centro del producto (descartando la zona cercana a la corteza superficial superior e inferior) cuyas dimensiones eran 2.65 cm de diámetro y 1.5 cm de alto. Tanto para madalena como para bizcochuelo en ambos ensayos de textura se analizaron cuatro muestras.

Las condiciones experimentales para cada prueba se encuentran detalladas en tabla 2.3.

Tabla 2.3. Características y parámetros estudiados para cada ensayo de textura.

Ensayo	Velocidad (mms ⁻¹)	Deformación (%)	Otra característica
TPA	0.5	20	Tiempo entre dos ciclos 10 s
Relajación	0.5	50	Método AACC 74-09 [*]

2.5 Estudio Sensorial

Para los profesionales especializados en la industria de alimentos la palabra calidad tiene múltiples significados. Desde un nivel muy básico de calidad se debe lograr la aceptación de los consumidores. Sin embargo, bajo esta simple definición de aceptación existen numerosas expectativas sobre el mismo producto: valores nutricionales, vida útil, apariencia, sabor, costo. Este enfoque es altamente subjetivo y varían considerablemente los niveles y apreciaciones individuales de calidad dependiendo del consumidor. Sin embargo, es usual encontrar una cierta tendencia en las calificaciones y preferencias del público consumidor. Estas medidas sensoriales son el resultado de la observación y degustación del producto en sí, seguido de la ponderación de la calidad realizada por los mismos consumidores. La relación entre calidad percibida por los consumidores y los atributos de calidad medidos a través de técnicas instrumentales es lo que determina la definición completa de calidad del alimento (Moskowitz, 1995).

En consecuencia, para completar este estudio se analizó el efecto de las condiciones operativas de horneado en la percepción sensorial de calidad de ambos productos, a través de distintos ensayos que se describen a continuación.

2.5.1 Aceptabilidad sensorial

Para medir la preferencia de los consumidores respecto de un determinado producto se utilizan pruebas afectivas. El principal propósito de las mismas es evaluar la respuesta (reacción, preferencia y/o aceptación) por parte de los consumidores reales o potenciales. La

aceptabilidad se define como la disposición de un individuo a consumir un determinado alimento o bebida en circunstancias particulares, en un momento dado (Meilgaard y col., 2006).

La clave para realizar una predicción acertada sobre la aceptabilidad de un alimento dado es identificar y cuantificar los elementos subjetivos y hedónicos que contribuyen a la evaluación global del mismo. Las pruebas de aceptabilidad buscan cuantificar el grado de aceptación sensorial de un alimento, es decir cuánto le agrada o desagrada el producto utilizando una escala hedónica.

Para determinar las razones de la preferencia o el rechazo de una muestra en las pruebas de aceptabilidad se incorporan preguntas acerca de ciertos atributos específicos tales como: apariencia, color, aroma, sonido, textura, sabor (Meilgaard y col., 2006).

En el presente trabajo se realizaron ensayos de aceptabilidad sensorial por atributos mediante un panel integrado por consumidores habituales de panificados dulces.

2.5.1.1 Madalena

Para comenzar con la puesta a punto de las técnicas y de modo de poder acercarnos al concepto de calidad inherente a este producto y otros similares, se realizó un estudio preliminar con marcas comerciales que se encuentran en el mercado local. El objetivo principal de esta etapa fue analizar las características físicas y sensoriales de madalenas procesadas industrialmente que se venden listas para consumir.

Particularmente, el ensayo sensorial se realizó reuniendo 45 consumidores habituales de panificados dulces (panel no entrenado, 40% hombres, 60% mujeres), con edades entre 25 y 65 años, de la ciudad de La Plata. La evaluación se realizó en una sala a temperatura ambiente (25°C) con luz uniforme. Cada panelista recibió cuatro muestras, de 20 g cada una (media madalena), una por cada marca comercial empleada. En la encuesta (figura 2.15) se indagó acerca de la apreciación general (aceptabilidad) de las muestras presentadas utilizando una escala hedónica estructurada de nueve puntos, anclada en los puntos “Me disgusta mucho”, “Me es indiferente” y “Me gusta mucho”. A su vez se les solicitó a los evaluadores que detallaran cuáles eran las características que causaban una mejor aceptabilidad del producto (mayor ponderación).

Si bien los resultados se discuten con mayor detalle en el capítulo 3, el análisis preliminar global de estos resultados y de los ensayos instrumentales complementarios (densidad, textura, porosidad) se observó que desde el punto de vista de los consumidores se prefieren productos más livianos (menor densidad y firmeza) y aireados (mayor porosidad). Es decir, la consistencia del producto juega un rol fundamental.

Nombre:..... Fecha: / /

Evaluador N°:.....

Evaluación sensorial: Madalenas

Usted recibirá 4 muestras de **madalenas**, ordenadas al azar, codificadas con números de tres dígitos. Por favor, evalúe según su criterio la aceptabilidad general de cada muestra, usando la escala que se detalla a continuación:

Muestra n° 835								
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me disgusta mucho				Me es indiferente				Me gusta mucho

Muestra n° 381								
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me disgusta mucho				Me es indiferente				Me gusta mucho

Muestra n° 955								
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me disgusta mucho				Me es indiferente				Me gusta mucho

Muestra n° 498								
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me disgusta mucho				Me es indiferente				Me gusta mucho

Defina con sus propias palabras la/s característica/s más apreciada/s en las muestras analizadas

Figura 2.15. Planilla presentada a los evaluadores en los ensayos sensoriales preliminares.

Teniendo en cuenta estos resultados, para comparar las distintas condiciones operativas de horneado en las muestras preparadas en este trabajo se diseñó un ensayo de aceptabilidad sensorial orientado a evaluar la consistencia.

En esta etapa, como principal objetivo se planteó evaluar si los consumidores perciben diferencias entre las muestras horneadas bajo distintas condiciones y, si es así, cuál es la que prefieren. Para tal fin se utilizó una escala hedónica estructurada, similar a la utilizada en los ensayos preliminares. En la figura 2.16 se presenta la planilla utilizada para esta evaluación.

Nombre:..... Fecha: / /

Evaluador N°:...

Evaluación sensorial: Madalenas

Usted recibirá 5 muestras de **madalenas**, ordenadas al azar, codificadas con números de tres dígitos. Por favor, evalúe según su criterio la **consistencia** en cada muestra, usando la escala que se detalla a continuación:

Muestra n° 727								
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me disgusta mucho				Me es indiferente				Me gusta mucho

Muestra n° 351								
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me disgusta mucho				Me es indiferente				Me gusta mucho

Muestra n° 955								
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me disgusta mucho				Me es indiferente				Me gusta mucho

Muestra n° 596								
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me disgusta mucho				Me es indiferente				Me gusta mucho

Muestra n° 493								
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me disgusta mucho				Me es indiferente				Me gusta mucho

Defina con sus propias palabras la/s característica/s más apreciada/s en las muestras analizadas:

Figura 2.16. Planilla presentada a los evaluadores en el ensayo de aceptabilidad (consistencia) de madalena.

Para estos ensayos, el panel fue conformado por 50 personas (50% hombres, 50% mujeres) con edades entre 25 y 65 años de la ciudad de La Plata, todos ellos consumidores habituales de este tipo de productos.

El ensayo se realizó en tres series en tres días diferentes de modo de no introducir cansancio en el panel degustador que conlleven errores de apreciación (Meilgaard y col., 2006). Cada serie corresponde a un modo de procesamiento (CN, CF y CFH, respectivamente) y cada panelista evaluó cinco muestras de 20 g cada una (mitad de una madalena), una por cada temperatura de horno de ensayada. La evaluación se realizó en una sala a temperatura ambiente (25°C), con luz uniforme.

La apariencia de las madalenas también fue estudiada mediante análisis sensorial, pero con un método y enfoque distintos.

Se sabe que entre todos los atributos de calidad de los productos panificados, el color superficial es uno de los primeros que el consumidor percibe, siendo un factor decisivo para determinar la aceptabilidad de los mismos y que influye de manera directa en la decisión de compra. Por lo tanto resulta de interés cuantificar un valor de color óptimo superficial desde el punto de vista de los consumidores habituales de este tipo de producto. Para cuantificar el mencionado valor, se diseñó un ensayo aplicando conceptos de estadística de supervivencia.

El análisis de supervivencia es una herramienta estadística muy utilizada en estudios clínicos, epidemiológicos, biológicos y sociológicos. Comprende un conjunto de procedimientos estadísticos empleados para analizar aquellos tipos de datos que incluyen el tiempo entre dos sucesos (evento inicial y evento final) como variable respuesta (Hough y col., 2003). El evento final (genéricamente llamado falla) ocurre cuando el individuo presenta la característica para terminar el estudio (rechaza el producto). El tiempo de rechazo determinado por cada individuo, está sujeto a variaciones aleatorias y por lo tanto, formalmente, t es una variable aleatoria no negativa. Para interpretar una variable aleatoria del tipo tiempo, como la que se acaba de ilustrar se puede usar la llamada función de rechazo $F(t)$, que se define como la probabilidad de que un consumidor rechace un producto almacenado antes del tiempo t .

Por otro lado, el tiempo puede ser reemplazado por otra variable: concentración de ingredientes, color, condiciones de proceso, etc. En este sentido Sosa y col. (2008) aplicaron esta técnica para determinar sabor salado en panes variando la concentración de sal; López Osornio y col. (2008) evaluaron la temperatura final de cocción óptima de carne bovina tomando como referencia cartas de color de diferentes grados de cocción. En referencia a la elección de un color óptimo desde el punto de vista del consumidor, Garitta y col. (2006) determinar el color de yogurt de frutilla preferido por los consumidores, en base al análisis de siete productos con diferente intensidad de color rojo.

En cada ensayo cada panelista recibió cinco muestras obtenidas a distintos tiempos de horneado y que consecuentemente presentan distinto color superficial, las cuales representan cinco valores del índice de pardeamiento BI: 67, 81, 105, 116 y 126 respectivamente (figura 2.17).

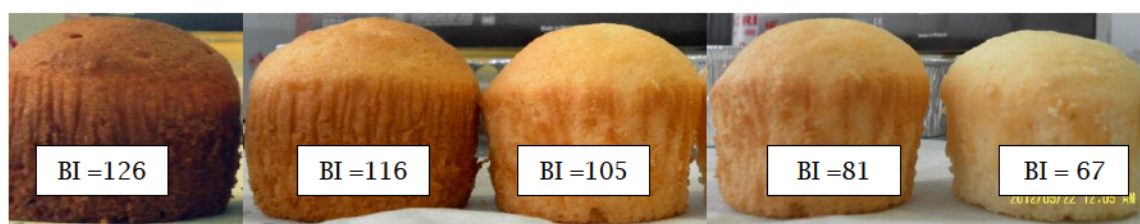


Figura 2.17. Madalenas presentadas para la evaluación sensorial de color superficial.

Estas muestras fueron obtenidas bajo el modo convección natural, operando a una temperatura nominal de 160°C. La evaluación se realizó en una sala a temperatura ambiente (25°C) con luz uniforme, y los evaluadores debían indicar su percepción sobre el color superficial, con las muestras dispuestas en orden aleatorio. En la figura 2.18 se muestra la planilla presentada a los evaluadores, donde se calificaba cada muestra como muy clara, de color aceptable (“Ok”) o muy oscura.

NOMBRE:..... FECHA: / /

Evaluador N°:

Evaluación del color de madalenas

Según su preferencia, que le parece el color de cada madalena?

	Muy clara	Ok	Muy oscura
Muestra N° 745	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muestra N° 323	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muestra N° 457	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muestra N° 532	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muestra N° 684	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 2.18. Planilla presentada al panel para evaluar el color superficial de madalena.

Cabe aclarar que es imposible determinar un color ideal que resulte óptimo para todos los consumidores o incluso para los panelistas que intervienen en el ensayo. El objetivo es encontrar un color óptimo (en nuestro caso un valor de BI definido como BI_{op}) que maximice la

proporción de consumidores que lo encuentran apropiado. En este ensayo en particular se presentan dos eventos de interés desde el punto de vista del consumidor: la transición de “Muy claro” a “Ok” y la transición de “Ok” a “Muy oscuro”, que pueden analizarse por separado mediante la estadística de supervivencia originando dos funciones rechazo, definidas a continuación:

$R_c(BI)$ = la probabilidad de que un consumidor rechace una muestra de madalena con el color = BI porque es muy clara, siendo $R_c(BI) = P(BI_{op} > BI) = 1 - F(BI)$

$R_o(BI)$ = la probabilidad de que un consumidor rechace una muestra de madalena con el color = BI porque es muy oscura, siendo $R_o(BI) = P(BI_{op} < BI) = F(BI)$

Para estimar ambas funciones de rechazo se maximiza la llamada función de verosimilitud que fue ajustada con distintos modelos paramétricos (Weibull, normal, lognormal, logistic, loglogistic) empelando el paquete estadístico R 3.0.1 (2013) que tiene un módulo especialmente dedicado a estadística de supervivencia.

2.5.1.2 Bizcochuelo

El efecto de las distintas condiciones operativas de horneado en la calidad de las muestras de bizcochuelo fue evaluado también por un ensayo de aceptabilidad sensorial, diagramado con algunas modificaciones respecto a los anteriores.

Nuevamente se trabajó con un panel no entrenado integrado por 48 consumidores habituales de este tipo de productos (40% hombres, 60% mujeres) de edades entre 25 a 65 años, habitantes de la ciudad de La Plata. Cada uno de ellos recibió tres porciones, una por cada temperatura de horno ensayada, de alrededor de 20 g cada una. De forma análoga a los anteriores, este ensayo se realizó en tres series, en días distintos, una por cada modo de horneado (CNb, CFb y CFHb, respectivamente).

Para este producto, y teniendo en cuenta los resultados de madalena (producto que se estudió previo a bizcochuelo) los cuales serán detallados en profundidad en el capítulo 3, a los consumidores se les solicitó evaluar y ponderar cuatro características, dos referidas a la corteza superficial (apariencia y cantidad) y dos referidas a la miga (consistencia y esponjosidad). La planilla utilizada se presenta en la figura 2.19.

Nombre.....		Fecha.....		Evaluador N°
Usted recibirá 3 muestras de bizcochuelo, ordenadas al azar, codificadas con números de tres dígitos. Por favor, evalúe según su criterio cada muestra y responda las consignas correspondientes a la corteza superficial y a la miga interna, usando la escala que se detalla a continuación:				
Miga interior				
Muestra nº 727				
Corteza superficial				Alguna característica que desee destacar....
La cantidad de corteza: <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho La apariencia de la corteza: <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho	La consistencia al masticar <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho La esponjosidad: <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho			
Muestra nº 351				
La cantidad de corteza: <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho La apariencia de la corteza: <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho	La consistencia al masticar <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho La esponjosidad: <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho			
Muestra nº 955				
La cantidad de corteza: <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho La apariencia de la corteza: <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho	La consistencia al masticar <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho La esponjosidad: <input type="checkbox"/> Me disgusta mucho <input type="checkbox"/> Me es indiferente <input type="checkbox"/> Me gusta mucho			

Figura 2.19. Planilla presentada a los evaluadores para el ensayo de aceptabilidad de bizcochuelo

2.6 Análisis Estadístico

Los resultados obtenidos fueron evaluados estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA). En el caso de presentar diferencias, la comparación de medias se realizó mediante el test de Fisher a un nivel de significación de 0.05.

Tanto el ANOVA como el test de Fisher se realizaron utilizando las herramientas de análisis estadístico de Excel (Microsoft, Office).

CAPÍTULO 3

MADALENAS: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Madalenas: Resultados y Discusión

Madalena es un producto panificado dulce ampliamente consumido en Argentina. Como se mencionó, los primeros registros de este producto datan del año 1750, de la región de Lorraine, en el norte de Francia. Allí comenzó a hacerse cada vez más popular, expandiéndose por toda Francia, luego España y, durante el siglo XIX fue un producto de panadería altamente difundido por toda América Latina (Caffier, 2006). Debido a este recorrido del producto y su adaptación en distintas culturas, hoy en día se conocen numerosas recetas, e inclusive formas adaptadas bajo la misma denominación.

Originalmente la madalena era preparada como bocadillo dulce con forma similar a la del caparazón de una almeja de mar (figura 3.1.A). Aún hoy en toda Francia en las panaderías tradicionales (*pâtisseries*) se las encuentra bajo este formato. En la actualidad, en el mercado argentino se la reconoce por su forma similar a la de una torta pequeña, cilíndrica, con una superficie redondeada (figura 3.1.B). Es horneada en moldes de papel rizado que el consumidor retira a la hora de consumirla. Se pueden hallar gran variedad de sabores de madalena en el mercado, aunque los más usuales son vainilla o limón. A su vez, existen versiones rellenas con distintos dulces o jaleas frutales, siendo el más empleado en nuestro país el dulce de leche.

Popularmente el nombre madalena se utiliza como sinónimo de muffin o cup cake debido a sus formas similares, a que todos ellos son consumidos a la hora del desayuno o la merienda y sus recetas están compuestas por los mismos ingredientes. Sin embargo, son preparados con recetas distintas y como consecuencia la madalena tiene un sabor más suave y menos dulce, y un contenido de grasa menor que los primeros.



Figura 3.1. Madalena en distintas presentaciones. A. Madalenas francesas (*madeleine*). B. Madalenas típicas del mercado argentino.

Este producto, como tantos otros similares al pan y sus derivados, adquiere y desarrolla sus atributos específicos (forma, volumen, color superficial, textura, sabor) durante el proceso de horneado. Como se postuló en el capítulo 1, el objetivo general de este trabajo de tesis es realizar un estudio integral de la influencia de las condiciones de horneado (temperatura del horno, modo de convección, aporte de vapor de agua a la cámara de horneado) en distintos aspectos de la cocción. Si bien la sección 2.2 del capítulo 2 (Materiales y Métodos) propone un orden en la descripción de los ensayos y estudios realizados, se ha decidido presentar los resultados con una pequeña reorganización de la información de modo de poder hilar el análisis y enriquecer la discusión.

3.1. Estudio fenomenológico del proceso de horneado de madalena

3.1.1. Perfiles de temperatura del horno

La variación de temperatura en la cámara del horno es una de las condiciones fundamentales que determinan no solo la cocción del producto y su calidad final, sino también otros parámetros específicos de procesamiento como son el coeficiente de transferencia de calor o el consumo energético. Si bien los hornos utilizados para este estudio poseen su propio sistema de control de temperatura, resulta fundamental analizar detenidamente el desempeño de cada condición para cada producto en particular.

La figura 3.2 presenta los perfiles de temperatura registrados en la cámara del horno para cada condición ensayada durante la cocción de madalena. En todas ellas observamos un período de calentamiento hasta una temperatura máxima seguido de un descenso continuo hasta una temperatura mínima, a partir de la cual recomienza el ciclo de calentamiento. Estos valores de temperatura mínima y máxima dependen del sistema de control propio del equipo, en los modos CN y CF se observan ondas periódicas regulares, típicas del tipo de control ON-OFF de estos hornos, en cambio en la condición CFH la onda es bastante irregular. Este comportamiento periódico también fue reportado por otros autores que estudiaron el comportamiento de hornos y condiciones operativas similares. Entre otros, Ploteau y col. (2012) realizaron una caracterización de un horno eléctrico para el horneado de pan. En este caso el calor era proporcionado por convección natural, radiación y conducción combinados a través de una placa de cemento. Los autores propusieron y describieron un modelo matemático para el flujo de calor entre el equipo y el producto. La variación de temperatura registrada en la placa y, en menor medida, la temperatura del aire de la cámara del horno, siguieron esta forma cíclica previamente mencionada. Goñi y Salvadori (2010, 2012) también reportaron este tipo de comportamiento de la temperatura del aire en el interior de la cámara de cocción de un horno doméstico eléctrico durante la cocción de cortes de carne vacuna.

Si bien en todas las condiciones ensayadas antes de comenzar la etapa de cocción el horno fue precalentado hasta alcanzar la temperatura nominal, se observa que al inicio del proceso para todos los casos bajo convección natural (figura 3.2) existe una pequeña demora para que la temperatura de la cámara vuelva a un valor cercano al valor medio registrado. Esto se atribuye al escape de aire caliente que provoca la apertura de la cámara para introducir la bandeja con el producto (el cual ingresa a temperatura ambiente). A pesar de que esta operación se repite en todos los ensayos, la recuperación de temperatura al trabajar bajo CF parece ser instantánea, y para CFH demanda menos tiempo que para CN. Adicionalmente para este último modo observamos que la incorporación de vapor provoca dificultad al sistema de control para regular la temperatura. Por esta razón en la figura 3.2 se puede observar que los períodos de calentamiento y luego de enfriamiento hasta una temperatura mínima no siguen un patrón periódico como el que se verifica en los otros modos.

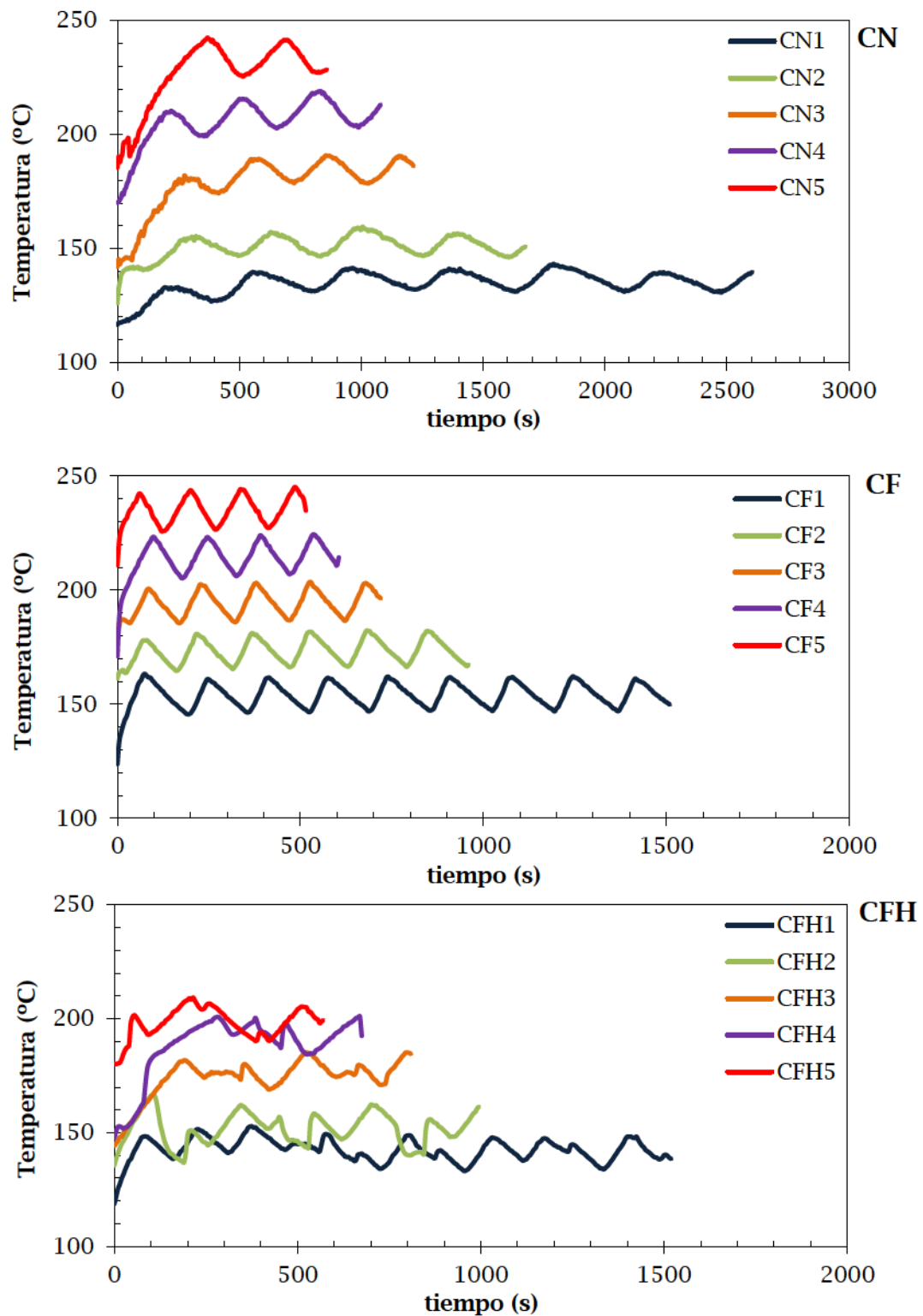


Figura 3.2. Perfiles de temperatura en el interior de la cámara del horneado durante la cocción de madalena.

Otro resultado derivado de la observación de los perfiles de temperatura de ambos hornos, es que en la zona de cocción la temperatura promedio difiere sensiblemente de la temperatura nominal seleccionada en el panel de control de cada horno (T_{nominal}), independientemente de la condición de horneado. Debido a esto, y con el fin de completar el análisis de los distintos parámetros de proceso y de producto que se realizan en esta tesis, se caracteriza cada condición con una temperatura efectiva (T_{efectiva}) definida como la temperatura media de los valores registrados en la cámara (precalentada) durante la cocción del producto.

La tabla 3.1 presenta los valores de temperatura efectiva calculados para cada condición. Se encuentra que en el modo CF resulta siempre T_{efectiva} mayor a la nominal, mientras que en el modo CFH, por el contrario, en general la temperatura efectiva es menor a la nominal. Sin embargo, para ambas condiciones T_{efectiva} presenta una variación promedio de ± 6 y ± 6.4 , para CF y CFH respectivamente; mayor a la encontrada en los ensayos en el modo CN, para los cuales la amplitud de la onda de temperatura es de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Este factor puede deberse a que se trabajó con dos equipos distintos, el control del horno Ariston (condición CN) es más sensible.

Tabla 3.1 Temperatura nominal y temperatura efectiva ($^{\circ}\text{C}$) durante la cocción de madalena.

T_{nominal}	140	160	180	200	220
	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
T_{efectiva}	135.3 ± 4.0	150.6 ± 4.6	180.4 ± 5.6	205.8 ± 6.1	229.2 ± 7.0
	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
T_{efectiva}	154.0 ± 5.1	173.1 ± 5.2	194.0 ± 5.5	213.7 ± 7.8	235.0 ± 6.2
	CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
T_{efectiva}	142.5 ± 5.0	151.7 ± 6.9	174.0 ± 8.5	192.8 ± 5.0	198.2 ± 6.7

Para completar este análisis se trazan las curvas operacionales, definidas como la función existente entre las variables T_{nominal} y T_{efectiva} (figura 3.3). En todos los casos estudiados se verifica una dependencia lineal ($R^2 > 0.98$). Estas curvas permiten predecir la temperatura media efectiva para otras condiciones de temperatura nominal, distintas a las ensayadas en este trabajo.

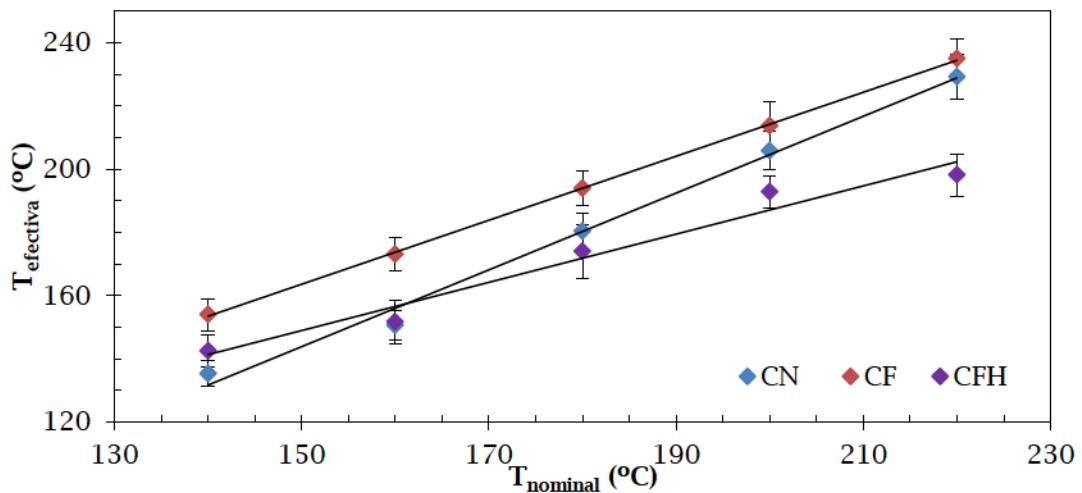


Figura 3.3. Temperatura efectiva del horno vs. temperatura nominal del horno durante la cocción de madalenas.

3.1.2 Expansión volumétrica

Con el objetivo de seguir la expansión volumétrica del producto durante el tiempo real de proceso se realizaron varias pruebas piloto filmando la cocción con una cámara digital colocada fuera de la cámara del horno, apoyada en la ventana de la misma, ya que no contamos con tecnología que pueda ser incorporada a su interior y que soporte altas temperaturas. Sin embargo estos ensayos no prosperaron, debido a la falta de nitidez que produce el efecto del vidrio de la ventana el cual refleja el medio externo dificultando el campo de visión del interior del mismo. Todo esto, sumado al error propio de la lectura realizada por el operario, hace que el registro filmado involucre una lectura de valores de altura con mayor probabilidad de error. Asimismo, como se menciona en la sección 2.2.4, las madalenas en particular presentan tiempos de expansión y de formación de estructura muy breves, que dificulta aún más el registro del cambio de volumen en tiempo real de proceso.

En la bibliografía actual encontramos autores que han analizado la evolución de altura total, en definitiva la expansión volumétrica, como parámetro de calidad de muffins, producto que se hornea con un molde muy similar al de madalenas. Entre ellos, Martinez-Cervera y col. (2014) determinaron la altura final de muffins con calibre, junto con otros parámetros estructurales y propiedades reológicas del producto, con el objetivo de estudiar el efecto del reemplazo de sacarosa por polioles en muffins. Matos y col. (2014) midieron la altura final de muffins con la misma técnica (calibre) junto con otras determinaciones como pérdida de peso, volumen específico y propiedades reológicas de la masa de muffins preparados a base de harina de arroz (libres de gluten) de modo de comparar la calidad de este producto alternativo para celíacos con muffins de formulación convencional.

Si bien los antecedentes encontrados comparan y analizan el comportamiento de este parámetro de calidad ante modificaciones en la formulación del producto, en este trabajo se realiza de modo similar la medición de altura final con calibre con el fin de aportar al análisis de la influencia de las distintas condiciones de proceso.

Partiendo de una altura inicial de producto (mezcla fluida) en el molde de cocción de 2.0 ± 0.1 cm la altura final promedio medida en el centro de la madalena (punto más alto) resulta 4.8 ± 0.1 , 5.1 ± 0.1 y 4.9 ± 0.1 para madalenas horneadas bajo CN, CF y CFH, respectivamente; mientras que en los extremos de las muestras la altura, independientemente de la condición de proceso, aumenta un 35% como máximo, esto es, valores finales en el contorno del producto de alrededor de 2.7 ± 0.3 cm. Estos resultados dejan en evidencia la dependencia de la evolución de altura del producto con la coordenada radial. En la tabla 3.2 se detallan los valores de altura final de madalena medidos en $r=0$ (centro) y $r=2.35$ cm (borde) para todas las condiciones de horneado ensayadas.

Tabla 3.2. Valores de altura final (cm) medidos en muestras de madalena.

	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
centro	4.6 ± 0.2	4.8 ± 0.3	4.9 ± 0.3	4.8 ± 0.1	5.0 ± 0.4
borde	2.2 ± 0.1	2.2 ± 0.2	2.6 ± 0.3	2.6 ± 0.1	2.7 ± 0.2
	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
centro	5.1 ± 0.3	4.9 ± 0.4	5 ± 0.2	5.2 ± 0.2	5.1 ± 0.3
borde	3 ± 0.1	2.9 ± 0.1	3 ± 0.2	3 ± 0.3	3.1 ± 0.2
	CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
centro	5.1 ± 0.1	4.9 ± 0.1	4.8 ± 0.2	5 ± 0.3	4.8 ± 0.1
borde	2.6 ± 0.1	3 ± 0.2	3.1 ± 0.1	3 ± 0.1	3.1 ± 0.2

De modo ilustrativo la figura 3.4 presenta dos imágenes de madalena: una pieza entera luego del desmolde y otra de un corte central transversal, el cual permite ver la miga interna.

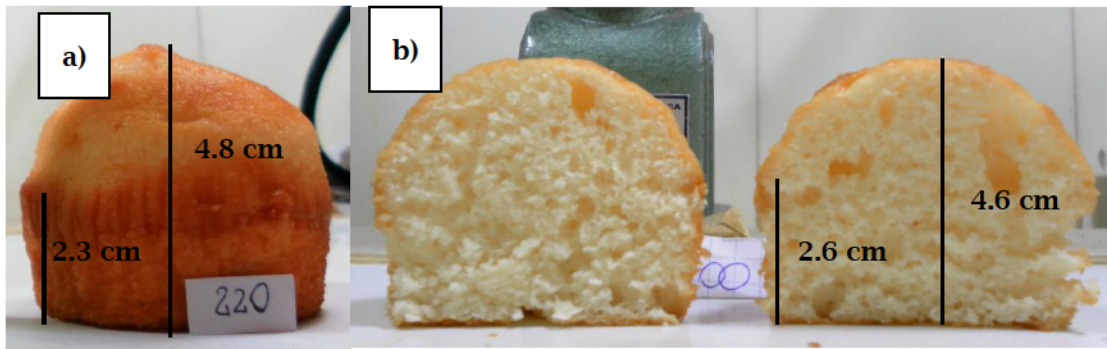


Figura 3.4. Madalenas luego del proceso de cocción. a) Muestra entera obtenida con la condición CN5. b) Corte transversal de una muestra horneada bajo CN2.

Teniendo en cuenta la forma y uniformidad de la superficie de la madalena se considera que la altura de la misma posee una funcionalidad cuadrática con el radio. A su vez, dicha forma se mantiene a lo largo de la cocción, pero en valores absolutos es dependiente del tiempo. En base a los resultados de altura final disponibles, que corresponden al tiempo de cocción final requerido para cada condición operativa, se propone una función de evolución de altura dependiente del tiempo (t) y del radio de la muestra (r , limitado por las dimensiones del molde utilizado, $0 < r < 2.35$ cm).

La ecuación 3.1 presenta la función evolución de altura (h , m) y la ecuación 3.2 la derivada de la misma respecto del tiempo, es decir la velocidad de incremento de altura (v_h , m s⁻¹) la cual será de utilidad para el modelado matemático que se desarrollará en la sección 3.1.4:

$$h = h_0 + (C_1 - C_2 r^2)t \quad 0 < r < 0.0235 \quad (3.1)$$

$$v_h = \partial h / \partial t = C_1 - C_2 r^2 \quad (3.2)$$

donde C_1 (m s⁻¹) y C_2 (m¹ s⁻¹) son constantes empíricas, las cuales quedan definidas a partir de la altura inicial (h_0) y final del producto (datos presentados en la tabla 3.2): en primer lugar, del valor de altura final en el centro del producto y mediante la ecuación 3.1 se calcula C_1 , luego conocido este valor y la altura final en el borde, de la misma ecuación 3.1 se calcula C_2 . Las mismas se informan en la tabla 3.3, ambos parámetros aumentan con la temperatura de horneado, para todos los modos de cocción estudiados.

De acuerdo a los resultados, el fenómeno de expansión guarda estrecha relación con la temperatura y con la condición de operación, es decir con la transferencia de energía y el modo en que esta ocurre en el interior del producto (Wagner y col. 2007).

Tabla 3.3. Constantes empíricas C_1 y C_2 correspondientes a las ecuaciones 3.1 y 3.2.

	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
$C_1 (10^5)$	1.0	1.3	1.9	2.6	3.1
$C_2 (10^2)$	2.0	2.2	3.3	4.5	5.0
	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
$C_1 (10^5)$	1.7	2.5	3.5	4.5	5.5
$C_2 (10^2)$	2.5	3.7	5.0	6.6	7.5
	CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
$C_1 (10^5)$	1.5	2.1	2.6	3.4	3.9
$C_2 (10^2)$	2.6	3.0	3.5	4.5	5.0

3.1.3 Perfiles de temperatura en el interior del producto

La variación de temperatura en el interior del producto provee información fundamental para estudiar el flujo de calor durante la cocción. En un horno de convección, numerosos mecanismos de transferencia de calor desde el ambiente hacia el producto actúan acoplados. Ellos son: convección de calor desde el aire a alta temperatura que circula en el interior de la cámara de horneado (forzada o naturalmente), radiación desde las superficies de calentamiento y conducción desde las superficies de contacto (bandejas y molde). Todo el calor transferido al producto resulta en un incremento de la temperatura de las superficies expuestas, y progresivamente, en el interior gracias a la transferencia de energía por conducción. A su vez, las reacciones que ocurren debido al aumento de la temperatura interna (gelatinización del almidón, desnaturalización de proteínas, entre otras) provocan cambios de fase (transformación de la mezcla fluida inicial en una estructura sólida porosa) y variaciones en el contenido de humedad del producto, principalmente en la superficie expuesta originando la formación de la corteza deshidratada (Sakin y col., 2007).

En la figura 3.5 se presenta la evolución de la temperatura interna (T_{interna}) del centro de la madalena. Estas curvas son promedio de dos ensayos de cocción para todas las condiciones operativas estudiadas. Independientemente del modo de horneado, para todas las condiciones ensayadas la curva de T_{interna} en función del tiempo presenta dos etapas: un periodo de calentamiento, donde la temperatura crece continuamente hasta que alcanza un valor de estabilización (plateau) y una etapa final en la cual se mantiene constante en un valor cercano a 100 °C.

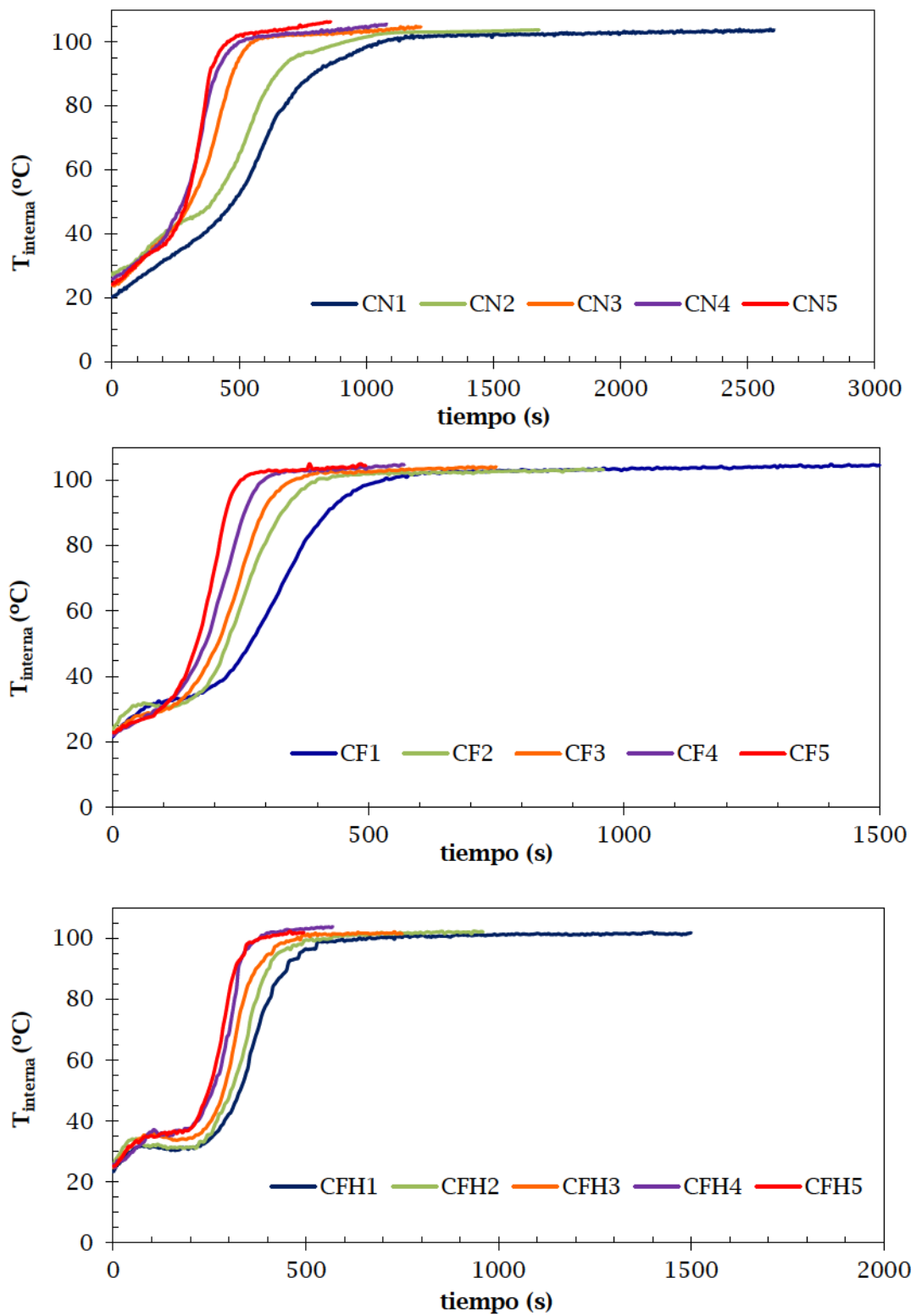


Figura 3.5. Temperatura en el interior de madalena durante el horneado.

Este comportamiento también fue informado en numerosos estudios de horneado de otros productos de panadería: pan (Therdthai y col., 2002; Zhang y Datta, 2006; Purlis y Salvadori, 2009a; Pérez-Nieto y col., 2010) y diferentes panificados dulces: bizcochuelo (Lostie y col., 2002a; Sakin-Yilmazer y col., 2012), cupcake (Sakin y col., 2007). Con respecto a los valores reportados de temperatura de estabilización se encontraron ligeras diferencias. En nuestro caso, en promedio, la temperatura interna se estabiliza en alrededor de 102 °C.

A pesar de las similitudes mencionadas, los perfiles de temperatura interna para cada condición ensayada presentaron características propias. En el modo convección natural la temperatura aumenta desde los primeros instantes, en cambio en ambos modos de convección forzada se verifica una fase lag o de retardo al inicio del proceso seguida de una etapa de aumento gradual.

Durante la etapa de aumento continuo de la temperatura interna puede estimarse una velocidad de calentamiento del producto. En nuestro caso dicho parámetro presenta valores dentro del rango [9 - 25], [17 - 40] y [21 - 37] °C min⁻¹ para los modos CN, CF y CFH respectivamente. De esto se infiere que la velocidad de calentamiento es sensiblemente menor cuando operamos con convección natural, lo cual se refleja en los tiempos de cocción que serán discutidos en las secciones siguientes.

En literatura encontramos algunos trabajos que han determinado la velocidad de calentamiento durante el horneado de productos similares. En este sentido, Chevallier y col. (2002) informaron velocidades de calentamiento durante el proceso de cocción de galletitas en un rango de [6 - 43] °C min⁻¹. Los autores señalaron que esta variable se modifica según la etapa del proceso estableciendo 3 períodos característicos de calentamiento y su respectiva velocidad, determinando, a su vez que estos valores y su variación dependen de la condición de horneado. Le Bail y col. (2011) evaluaron este parámetro durante el horneado de pan operando a 200 °C en experiencias con distinta cantidad de vapor inyectado en la cámara de cocción durante el proceso. Los autores reportaron velocidades de calentamiento en un rango de [6.6 - 9.8] °C min⁻¹ para muestras de pan de mayor tamaño que las madalenas procesadas en este trabajo, estableciendo que a mayor nivel de humidificación durante el proceso, menor velocidad de calentamiento experimenta el producto.

Anteriormente se mencionó que en la etapa final de horneado el producto presenta una temperatura de estabilización alrededor de los 100 °C. Numerosos autores han empleado las historias térmicas del interior del producto panificado para definir un tiempo de cocción que asegure la completa gelatinización del almidón y la desnaturalización de proteínas, características que se alcanzan cuando la temperatura del interior del producto llega a 95-98 °C (Therdthai y col., 2002; Ahrné y col., 2007; Purlis, 2011; Paton y col., 2013).

En este trabajo identificaremos a este tiempo característico, a partir del cual la temperatura interna ya no aumenta, como tiempo de mínima cocción, t_{min} . Experimentalmente, se ha observado que al alcanzar este tiempo de proceso la miga de la madalena presenta

completamente desarrollada la estructura sólida porosa característica del producto. No ocurre lo mismo con las características sensoriales, principalmente vinculadas a la corteza, que a t_{\min} aún no presenta un desarrollo completo de la reacción de Maillard (color dorado) ni experimenta la deshidratación necesaria para conferirle la rigidez que define la estructura final del producto. De modo ilustrativo la figura 3.6 muestra la corteza y la miga de una madalena horneada bajo CF1 durante el tiempo mínimo característico (475 segundos). Como se observa, durante el enfriamiento de estas muestras obtenidas a t_{\min} se registra una constricción de la superficie, deformación del volumen y, como consecuencia apelmazamiento en la miga.



Figura 3.6. Madalena luego de enfriamiento a temperatura ambiente (25°C) horneada bajo CF1 durante 475 segundos.

A partir de las historias térmicas registradas, se calcula este tiempo característico, t_{\min} para cada condición ensayada. En la tabla 3.4 se presentan estos valores, los cuales se encuentran en un rango de [540-1350], [355-805] y [485-965] segundos para las condiciones CN, CF y CFH, respectivamente. Como primera conclusión surge que para los tres modos de horneado, el t_{\min} disminuye significativamente con el aumento de la temperatura de horneado.

Tabla 3.4. Tiempo mínimo de cocción (s), experimental.

CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
985 ± 5	835 ± 6	535 ± 4	465 ± 4	430 ± 4
CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
475 ± 4	365 ± 3	335 ± 4	285 ± 3	240 ± 3
CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
545 ± 5	440 ± 4	415 ± 4	365 ± 3	350 ± 3

Con el objetivo de analizar la dependencia de los tiempos mínimos de cocción con las condiciones operativas de horneado, en la figura 3.7 se grafica esta variable en función de la temperatura efectiva, para las distintas condiciones ensayadas.

El tiempo mínimo de cocción muestra una dependencia de tipo exponencial con $T_{efectiva}$ (ecuaciones 3.3 y 3.4, $R^2 > 0.94$), pudiendo identificarse dos grupos de datos: convección natural (CN) y forzada (CF y CFH), respectivamente. De acuerdo a estos resultados, el efecto de la inyección de vapor respecto del tiempo de proceso se manifiesta mediante una disminución de la temperatura efectiva de horneado, producto de la energía requerida para vaporizar el agua líquida suministrada.

$$\text{CN: } t_{min} = 3182.7 \exp(-0.009T_{efectiva}) \quad (3.3)$$

$$\text{CF y CFH: } t_{min} = 1574.1 \exp(-0.008T_{efectiva}) \quad (3.4)$$

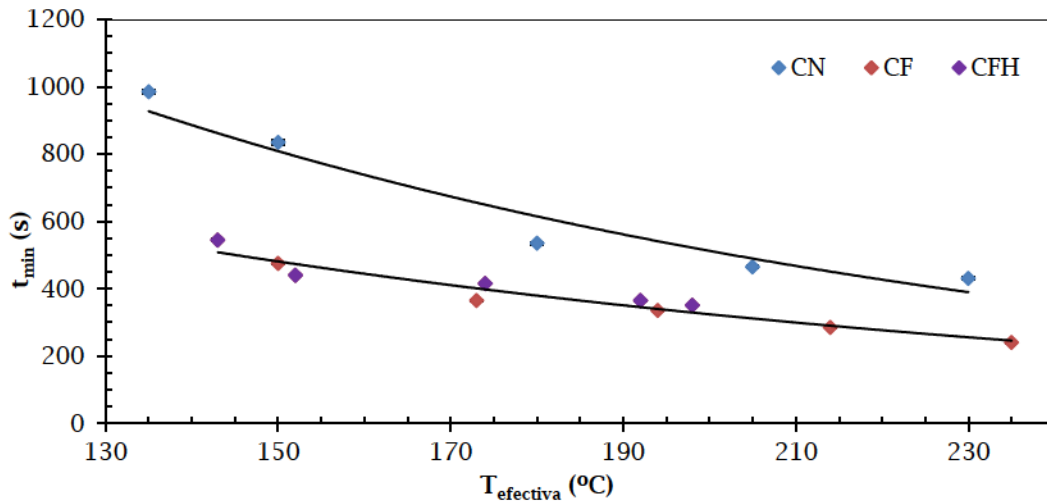


Figura 3.7. Tiempos mínimos de cocción en función de $T_{efectiva}$.

3.1.4 Modelado de la transferencia de energía

Complementando el estudio experimental de la influencia de las condiciones de proceso en la evolución de temperatura interna de madalena, se simula la transferencia de energía mediante un modelo matemático de elementos finitos, implementado en COMSOL 3.4 como se detalló en la sección 2.3 de materiales y métodos. La principal utilidad de esta herramienta radica en la posibilidad de extender el estudio de la influencia en las condiciones de proceso a otras condiciones operativas (caracterizadas por la temperatura del horno y por el coeficiente de transferencia de calor) y productos similares de otras formas y/o tamaños.

El dominio de simulación fue construido teniendo en cuenta las dimensiones originales de la madalena (mezcla en el molde previo al horneado). El modelo contempla la posibilidad de deformación de este dominio en el tiempo, de modo tal de incorporar la expansión volumétrica

registrada experimentalmente. En este sentido, como se detalló en el capítulo 2, se considera el desplazamiento del límite superior del dominio, cuya velocidad queda definida para cada condición en la sección 3.1.2.

La figura 3.8 muestra el dominio de simulación original luego de aplicar el mallado y la evolución del mismo durante distintos intervalos de tiempo hasta el tiempo final de simulación. Como se observa, el mallado triangular simple traza triángulos suavizados en todo el dominio, constituyendo así los elementos finitos que se utilizaran en el método de cálculo. A su vez, se aprecia una buena representación de la expansión volumétrica teniendo en cuenta la evolución de la forma geométrica observada experimentalmente (figura 3.4) y los valores de altura final de madalena (tabla 3.2).

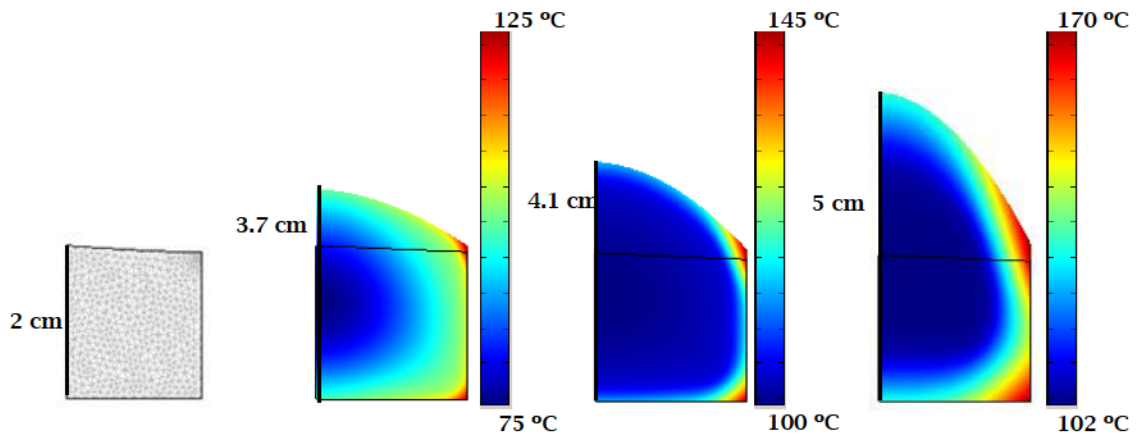


Figura 3.8. Dominio de simulación original, en dos instantes intermedios y al final de la simulación bajo la condición CN5 ($t=0, 300, 500$ y 900 s, respectivamente).

Como se mencionó previamente en la sección 3.1.1 la temperatura del ambiente de la cámara de horneado no coincide con la temperatura nominal (que se selecciona en cada equipo en su panel de control) y presenta una variación periódica alrededor de un valor medio (T_{efectiva}). En la condición de contorno respectiva (ecuación 2.3) se utilizó el valor promedio constante, detallado en la tabla 3.1.

En cuanto al coeficiente de transferencia convectivo, h_c ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) en las simulaciones numéricas, dada la poca variación de los coeficientes calculados para las temperaturas extremas ensayadas, se decidió adoptar dos valores numéricos de h_c para cada modo de cocción de acuerdo al siguiente detalle:

CN1, CN2 y CN3:	10;	CN4 y CN5:	13
CF1, CF2 y CF3:	25;	CF4 y CF5:	28
CFH1, CFH2 y CFH3:	20;	CFH4 y CFH5:	23

Estos se encuentran en el rango de valores de coeficientes utilizados por distintos autores en condiciones similares. Entre ellos podemos mencionar a Zaroni y col. (1995) quienes en su estudio de modelado de la cinética de pardeamiento (*browning*) de la corteza de pan utilizaron un horno eléctrico convectivo e informaron un coeficiente de transferencia igual a $20 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Lostie y col. (2004) desarrollaron un modelo de transferencia de calor y vapor de agua acopladas durante la cocción de torta esponjosa en un horno de convección natural, midieron y utilizaron un valor de coeficiente de transferencia igual a $18.5 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Sosa-Morales y col. (2004) estudiaron y modelaron matemáticamente la transferencia de calor y masa durante la cocción de galletitas pre cocidas y congeladas en un horno convencional a gas y en horno de microondas, utilizando para el primero un coeficiente igual a $30 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para la cocción convencional. Sakin-Yilmazer y col. (2012) informaron valores del coeficiente de transferencia iguales a 10.4 y $16.3 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, al simular las transferencias simultáneas de calor y masa durante la cocción en horno convectivo de torta savarín.

Como se detalló en la sección 2.3.2, las características del dominio que impactan en el balance de energía quedan definidas por las propiedades termofísicas: densidad, capacidad calorífica y conductividad, para este producto en particular (madalena) resultan las expresiones siguientes:

$$\rho = \begin{cases} 1300 - 8.27 T & T < 100 \\ 480 & T \geq 100 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$C_p = 2401 + 17911.4 \exp\left(-\exp\left(\frac{-T + 105}{4.6}\right) - \frac{T - 105}{4.6 + 1}\right) \quad (3.6)$$

$$k = \begin{cases} 0.25 + 0.18 \cdot 10^{-2} T & T < 100 \\ 0.2 & T \geq 100 \end{cases} \quad (3.7)$$

Si bien el software provee mucha información, como la evolución de la temperatura de todos los nodos de la malla, para validar los resultados de las simulaciones se compara la temperatura de un nodo representativo del centro térmico del cual, gracias a la posición estratégica de la termocupla, se cuenta con los datos experimentales, presentados previamente en el perfil de temperatura interna. Este perfil de temperatura simulado corresponde a las coordenadas (r, z) iguales a (0, 0.023) m del dominio de simulación y se presenta en la figura 3.9 junto con el perfil de temperatura experimental para todas las condiciones ensayadas.

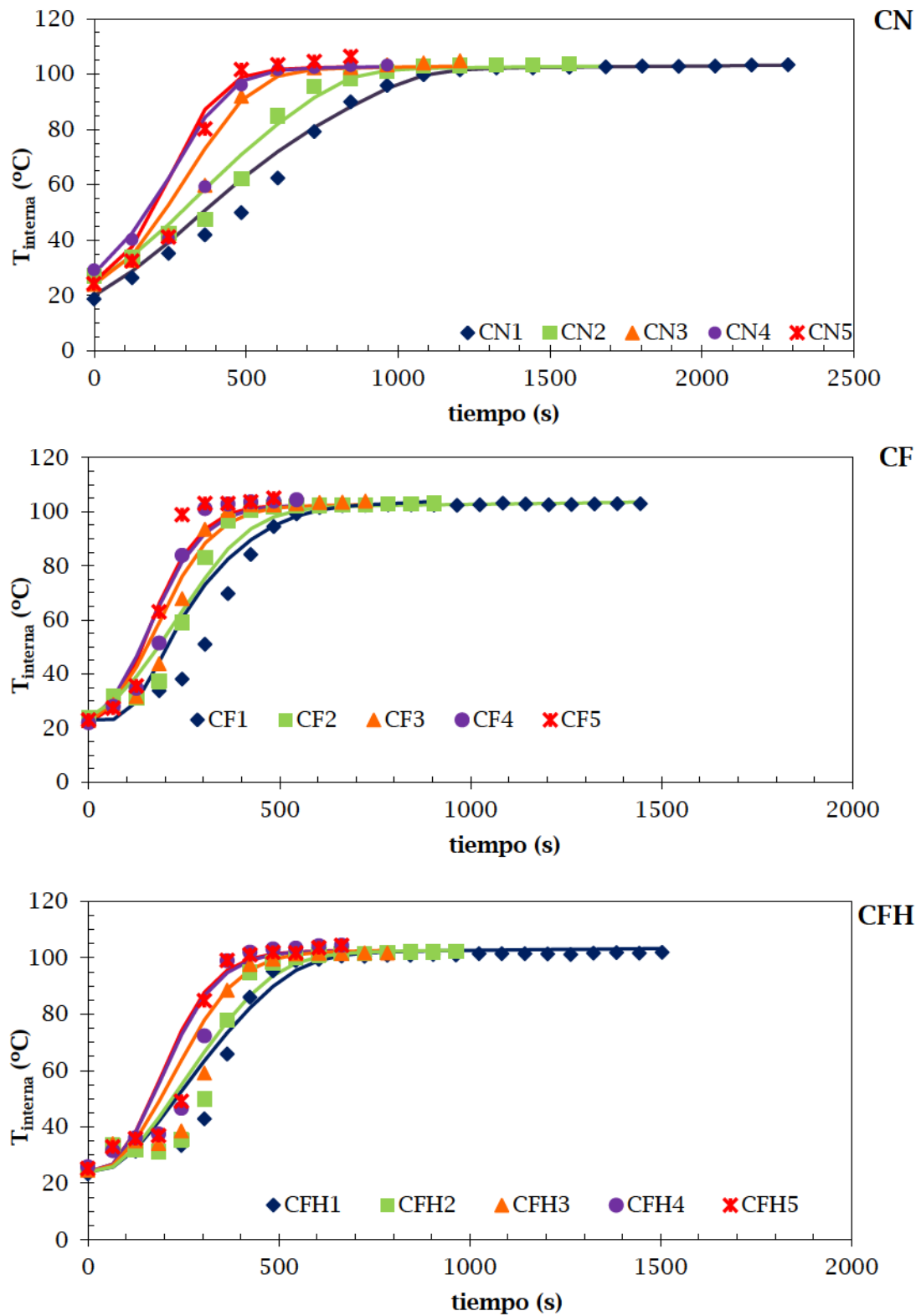


Figura 3.9. Temperatura en el centro de madalena, calculada (línea) y experimental (símbolo), durante el horneado.

Se observa que la simulación, en general, representa adecuadamente el comportamiento experimental, con forma sigmoidea en el primer período y una meseta alrededor de los 100°C al final de la cocción. Sin embargo, resulta evidente que el modelo disminuye su precisión cuando la temperatura de horneado aumenta. Asimismo, el cambio de pendiente en la curva T_{interna} vs. tiempo (transición del período de aumento continuo a la meseta de estabilización de la temperatura) es más drástico en las curvas experimentales, mientras que las curvas simuladas presentan un cambio de pendiente suavizado. Para cuantificar la precisión del modelo, se calcula el error relativo absoluto ε (%) entre temperaturas predichas y experimentales, según la ecuación 2.12.

En general, los valores de ε promedio calculado para todo el perfil de temperatura, se encuentra en un rango de [4.7 – 12.0] %, [6.9 – 9.6] % y [8.0 – 13.6] % para CN, CF y CFH, respectivamente. Teniendo en cuenta las simplificaciones del modelo, los errores medios no son desalentadores a los fines prácticos.

Asimismo, de acuerdo a lo observado gráficamente, el modelo no logró representar adecuadamente el período inicial de retardo en el aumento de la temperatura interna registrado particularmente en las muestras procesadas bajo las condiciones CF y CFH.

Tabla 3.5. Tiempo mínimo (s) calculado y error (%) asociado.

	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
t_{\min} (s)	1015	805	522	475	450
ε (%)	3	4	3	2	5
	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
t_{\min} (s)	468	460	380	320	300
ε (%)	1	26	13	12	25
	CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
t_{\min} (s)	562	522	437	390	380
ε (%)	3	18	5	7	9

Se ha mencionado previamente que la historia térmica del interior del producto permite determinar un tiempo mínimo de cocción. Es importante resaltar que si bien este tiempo asegura la completa transición interna de masa en miga (Purlis, 2012), no es suficiente para que el producto alcance las características sensoriales deseables en este tipo de productos.

Considerando que el modelo brinda una herramienta de predicción del tiempo mínimo de cocción, éste se calcula junto con el error relativo asociado, ε (respecto al valor de tiempo mínimo experimental). Los resultados se muestran en la tabla 3.5. De los mismos se concluye que el modelo resulta menos preciso para el modo convección forzada, donde el tiempo mínimo predicho presenta errores de hasta 26 % y 18 %, para CF y CFH, respectivamente. En cambio, para el modo convección natural el modelo predijo valores de t_{\min} con un error menor a 5 %.

3.1.4 Evolución de color superficial

Si bien el resto de los indicadores de calidad serán discutidos en la sección 3.2 y los resultados de aceptabilidad sensorial en la sección 3.3, analizamos a continuación la evolución de color superficial ya que, como podrá apreciarse en la discusión, utilizaremos los resultados para determinar un parámetro fundamental del proceso: tiempo óptimo de cocción.

Como se mencionó en la sección 2.4.3, se definió un índice de pardeamiento (browning index, BI), de modo de correlacionar los tres parámetros del modelo CIE L^* a^* b^* para cada medida de color superficial realizada.

En la literatura se encontraron varios antecedentes de trabajos que monitorearon las características de la superficie de los productos horneados, intentando seguir la evolución del proceso en sí. Así, Zaroni y col. (1995) modelaron la cinética de formación de corteza durante el horneado de pan mediante el seguimiento de $\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$ el cual evalúa la diferencia de color entre un color de referencia (en general el color inicial de la muestra) y los distintos valores de color medidos durante el proceso, informando que este parámetro llega a un valor máximo de 52 cuando el producto alcanza el estado quemado. Chanwal y col. (2011) usaron este modelo como un parámetro de calidad asociándolo a la optimización de horneado de pan. Purlis y Salvadori (2009a) también reportaron una cinética de primer orden para la evolución de color basándose en la variación de la luminosidad (L^*) de la corteza de pan. En cuanto a productos panificados dulces, Kemerli y col. (2011) y Sakin-Yilmazer y col. (2013) utilizaron el índice BI definido en la ecuación 2.13 para analizar la reacción de pardeamiento en galletitas y muffins, respectivamente. En sus trabajos encontraron que las condiciones de horneado (convección forzada vs. convección con humidificación) afectan el desarrollo y los valores de BI en el producto.

A modo ilustrativo y para familiarizar al lector con la representación del color mediante el índice BI, la figura 3.10 presenta muestras al inicio y en distintas etapas del proceso de cocción, indicando el valor de BI correspondiente, los parámetros del modelo CIE L^* a^* y b^* correspondientes se detallan en la tabla 3.6.

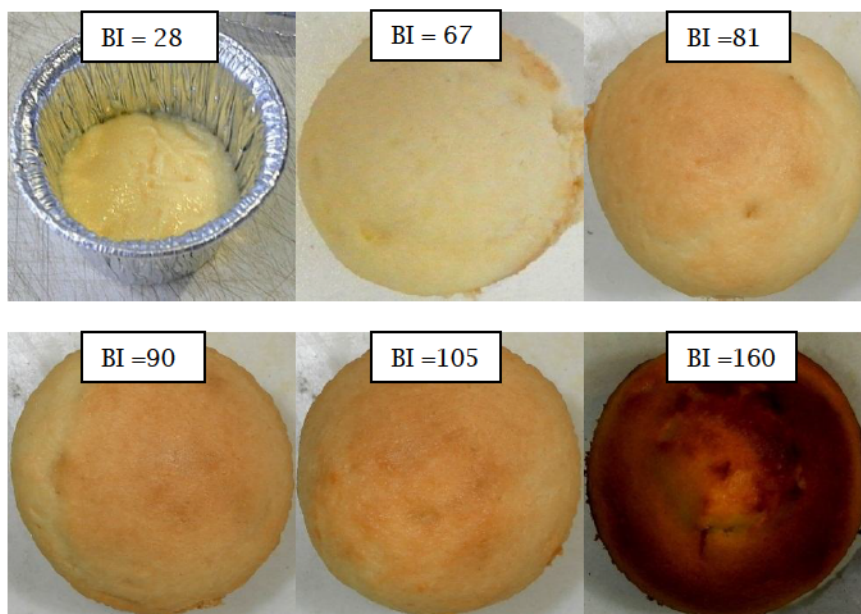


Figura 3.10. Variación del valor de BI de muestras de madalena en distintos estadios del proceso de horneado (distinto color superficial).

Tabla 3.6. Valores de L^* , a^* y b^* que corresponden a las imágenes de la figura 3.10.

BI	L^*	a^*	b^*
28	82.9 ± 1.4	-1.4 ± 0.1	22.1 ± 0.4
67	76.5 ± 1.7	1.6 ± 0.4	38.2 ± 0.3
81	73.3 ± 1.9	4.3 ± 0.5	40.8 ± 0.4
90	67.6 ± 1.5	2.4 ± 0.9	41.4 ± 2.4
105	65.3 ± 4.0	8.9 ± 1.2	41.8 ± 1.8
160	40.2 ± 2.0	20.6 ± 3.2	30.6 ± 4.2

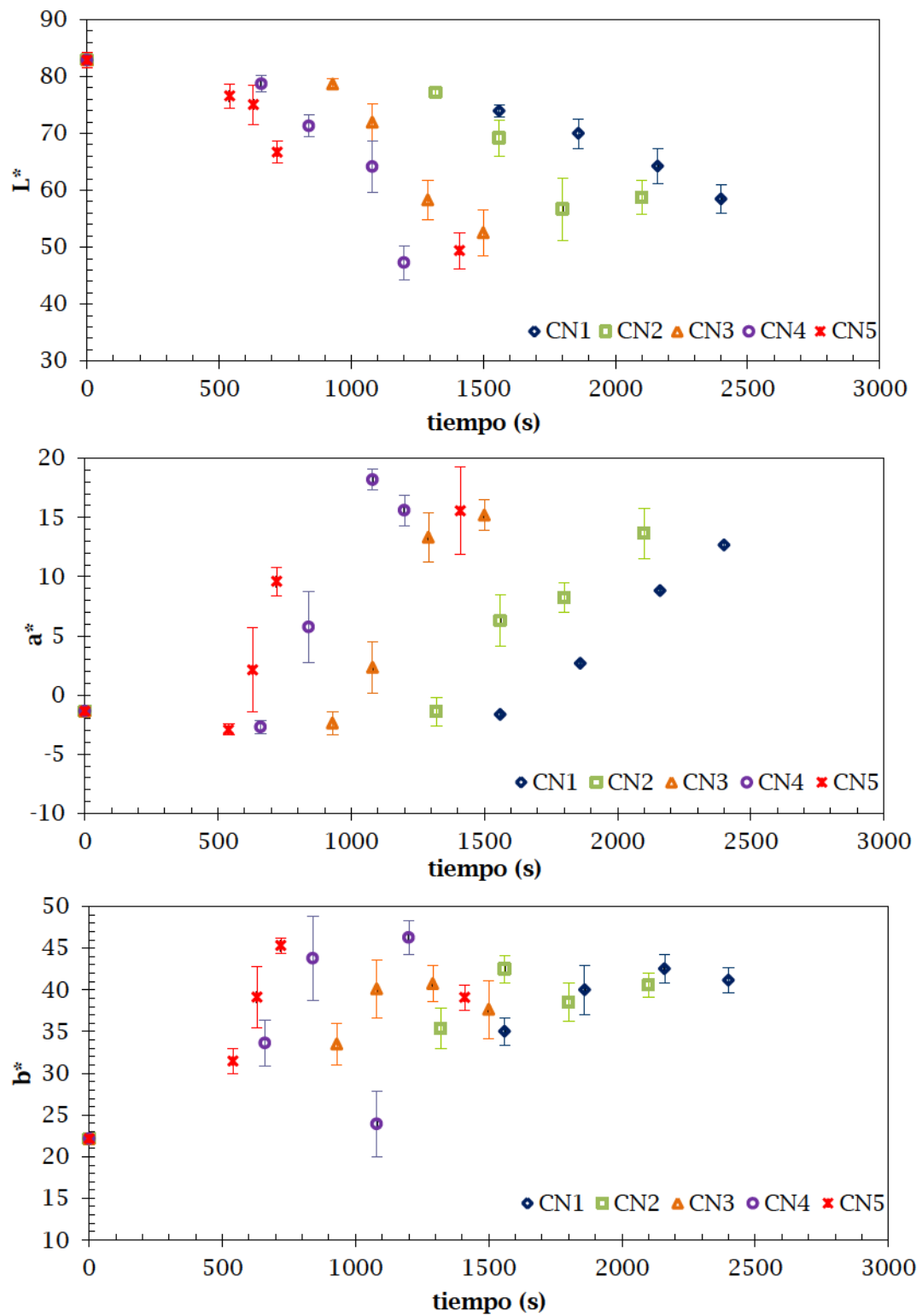


Figura 3.11. Variación de los parámetros L^* , a^* , b^* durante el proceso de cocción de madalenas bajo el modo de CN.

Teniendo en cuenta esta información podemos decir apresuradamente que a medida que BI aumenta (el color de la superficie se oscurece), el parámetro L^* disminuye y, por su parte los parámetros a^* y b^* aumentan. Para clarificar este análisis presentamos en la figura 3.11 la evolución de L^* , a^* y b^* para un modo operativo en particular (convección natural). Se observa que la luminosidad (L^*) presenta una primera fase donde no cambia significativamente para luego descender de manera continua, el parámetro a^* tiene un comportamiento contrapuesto, permanece constante durante la primera etapa y luego aumenta considerablemente. Finalmente la variación de b^* no presenta una tendencia clara respecto del tiempo de cocción.

A pesar de estas tendencias contrapuestas de los parámetros individuales de color, el índice de pardeamiento BI sí presentó una evolución clara en función del tiempo de horneado, que se presenta en la figura 3.12 para las distintas condiciones estudiadas. Los resultados revelan un fuerte impacto de la temperatura de cocción sobre el desarrollo de color superficial, independientemente del modo de cocción.

En líneas generales, la evolución del índice BI con el tiempo presenta una misma tendencia: el color inicial de la masa es ca. 28, luego la evolución del color superficial presenta un período de inducción (cuya duración depende de la temperatura del horno) donde el cambio es mínimo, y finalmente, el índice BI aumenta gradualmente hasta llegar asintóticamente a un valor cercano a 160, el cual representa la muestra quemada.

Este comportamiento de las curvas BI vs. tiempo puede ser ajustada por un modelo de tipo sigmoideo. En este sentido, se probaron cinco modelos distintos: orden cero, primer orden, parabólico, weibull y logístico. El modelo que mejor ajustó a los datos experimentales fue el logístico presentado a continuación:

$$BI = BI_{max} + \left(\frac{BI_0 - BI_{max}}{1 + e^{k_p(t-t_{1/2})}} \right) \quad (3.8)$$

donde BI es el índice de pardeamiento medido en el tiempo t, BI_0 es el índice de pardeamiento inicial ($t=0$), k_p es la constante de la reacción de pardeamiento (s^{-1}), BI_{max} es el valor máximo y $t_{1/2}$ es un tiempo medio cuando se alcanza un valor promedio entre el valor inicial BI_0 y el valor final BI_{max} . La elección del modelo brinda un muy buen ajuste ($R^2 > 0.96$) para todas las condiciones ensayadas.

Cabe entonces analizar la dependencia de los dos parámetros de este modelo (k_p y $t_{1/2}$) con las condiciones operativas, que en nuestro caso se resumen a dos variables, una continua, la temperatura efectiva de horneado, y otra discreta, que es el modo de operación del horno (CN, CF y CFH). Dichos parámetros se presentan en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Parámetros de la cinética de pardeamiento, ecuación 3.8.

	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
$t_{1/2}$ (s)	1976.1 ± 39.8	1576.3 ± 59.7	1150.7 ± 23.2	956.4 ± 39.4	685.1 ± 5.1
k_p (10^{-3} ; s^{-1})	3.1 ± 0.03	3.2 ± 0.02	6.5 ± 0.04	4.7 ± 0.03	13.5 ± 0.20
	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
$t_{1/2}$ (s)	1462.7 ± 35.7	903.8 ± 26.6	667.7 ± 24.0	546.7 ± 4.8	434.6 ± 14.6
k_p (10^{-3} ; s^{-1})	4.0 ± 0.03	6.5 ± 0.04	6.8 ± 0.04	11.1 ± 0.21	10.2 ± 0.06
	CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
$t_{1/2}$ (s)	1564.4 ± 32.4	1014.1 ± 32.6	799.9 ± 7.4	561.4 ± 17.4	550.5 ± 14.9
k_p (10^{-3} ; s^{-1})	2.9 ± 0.03	3.4 ± 0.03	7.9 ± 0.10	9.7 ± 0.05	9.5 ± 0.07

Se observa que ambos parámetros (k_p y $t_{1/2}$) dependen significativamente de la temperatura efectiva de horneado. Al aumentar la temperatura de operación la constante cinética k_p aumenta y el tiempo característico $t_{1/2}$ decrece. Por otro lado, con respecto a la influencia del modo de operación encontramos nuevamente que no hay diferencias significativas entre los modos CF y CFH.

Analizando con detenimiento los parámetros del modelo logístico, se halla una dependencia de la constante cinética k_p con la temperatura efectiva que se ajusta a la ecuación de Arrhenius, definida por una energía de activación (E_a) y un factor pre exponencial (k_0). La E_a (kJ mol^{-1}) resulta igual a 23.08 ± 7.49 y 27.09 ± 4.08 para las condiciones CN y CF/CFH, respectivamente. El factor k_0 (s^{-1}) toma valores de 2.51 ± 0.69 y 8.41 ± 0.08 para CN y CF/CFH, respectivamente.

Los valores de energía de activación calculados se encuentran en el rango de valores informados por otros autores que evalúan la evolución de color en este tipo de productos. Así, Zanoni y col.(1995) calcularon una E_a de $64.151 \text{ kJ mol}^{-1}$; Broyart y col. (1998) encontraron una E_a en el rango $[70-90] \text{ kJ mol}^{-1}$; Sakin-Yilmazer y col. (2013) informaron una E_a de $36.35 \text{ kJ mol}^{-1}$.

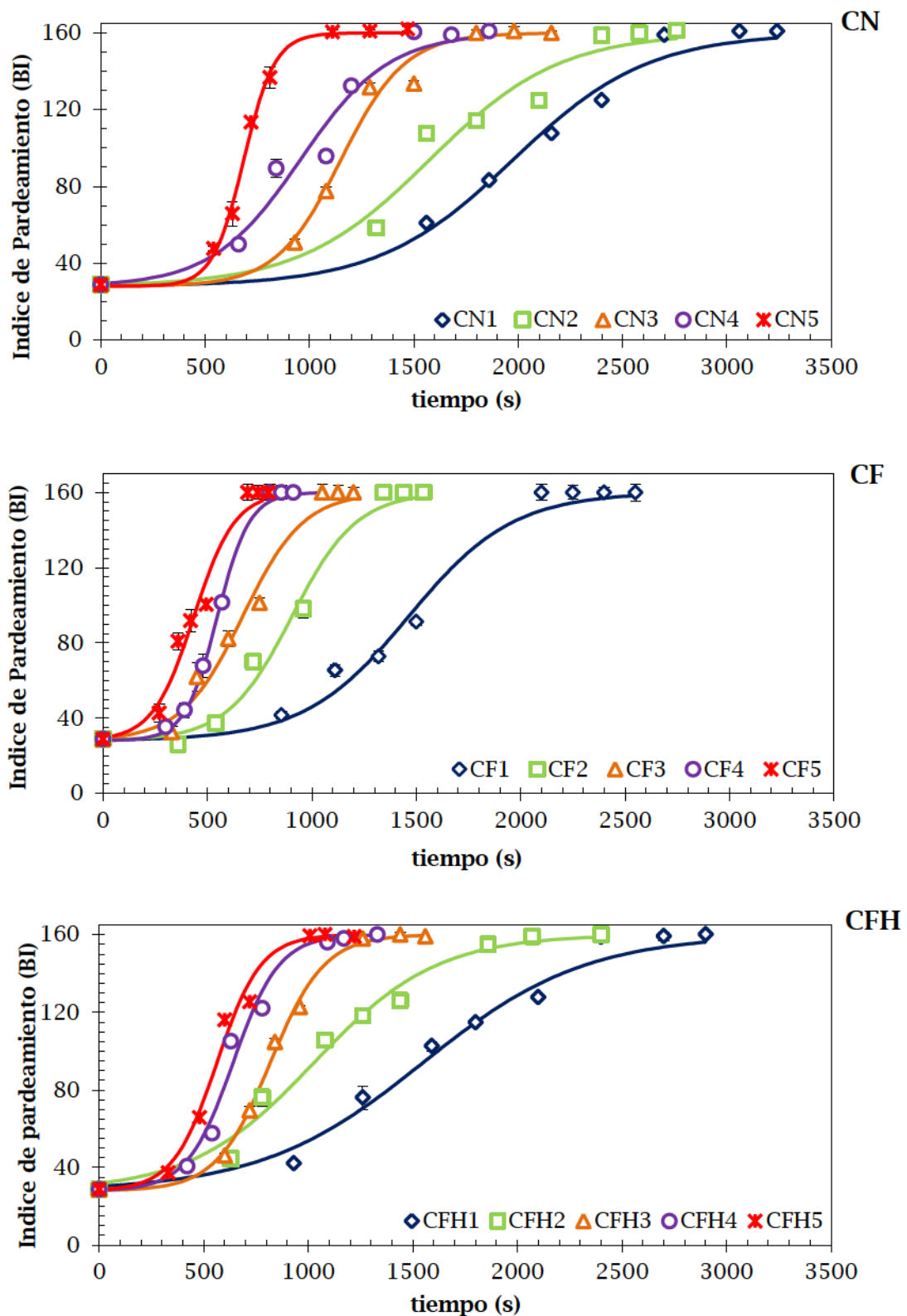


Figura 3.12. Índice de pardeamiento BI durante el horneado de madalenas; experimental (símbolo) y calculado (línea) para CN, CF, y CFH.

Por otro lado, el parámetro cinético $t_{1/2}$ (tabla 3.7) presenta valores en el rango [1980-685], [1463-435], [1565-550] para CN, CF y CFH, respectivamente. A su vez, en la figura 3.13 se observa que la dependencia de este parámetro con la temperatura de operación (T_{efectiva}) es de tipo exponencial ($R^2 > 0.93$, ecuaciones 3.9 y 3.10). Este comportamiento es similar al observado para los tiempos mínimos de cocción, no encontrándose diferencias significativas entre las condiciones CF y CFH.

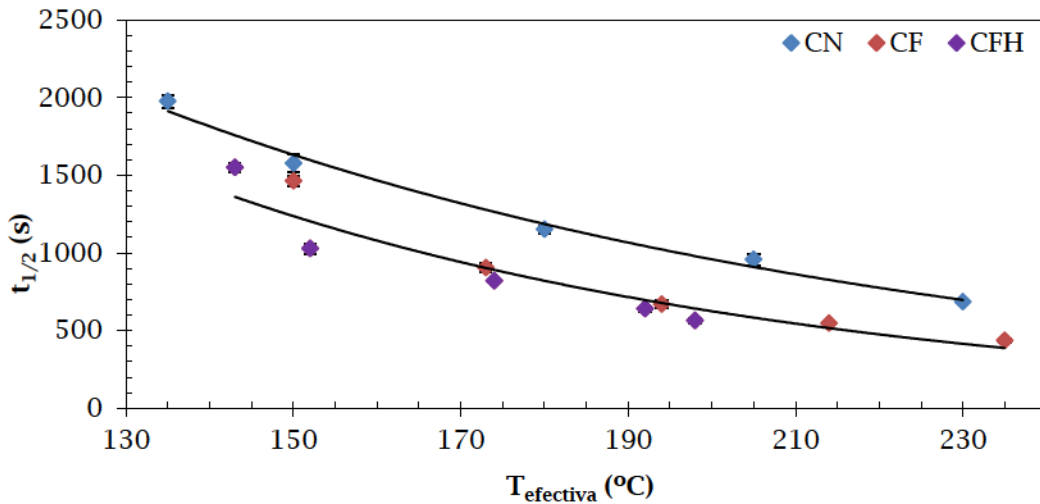


Figura 3.13. Dependencia de $t_{1/2}$ con la temperatura efectiva de operación.

$$\text{CN: } t_{1/2} = 8041.2 \exp(-0.011T_{\text{efectiva}}) \quad (3.9)$$

$$\text{CF y CFH: } t_{1/2} = 9624.1 \exp(-0.014T_{\text{efectiva}}) \quad (3.10)$$

Para completar el análisis, la ecuación 3.8 fue utilizada para representar las cinéticas de pardeamiento de otros productos panificados dulces encontrados en literatura: bizcochuelo de vainilla (Baik y col., 2000b), muffins (Yilmazer y col., 2011), y cookies (Kemerli y col., 2011). Los resultados de los parámetros cinéticos de BI para estos casos se presentan en la tabla 3.8. Estos confirman que el modelo logístico propuesto es adecuado. Así mismo, ambos parámetros k_p y $t_{1/2}$ dependen de las características del producto (volumen y formulación) y de las condiciones de horneado (temperatura del proceso y coeficiente de transferencia de calor), por otro lado el parámetro BI_{max} es una característica propia del color final de cada producto en particular.

Tabla 3.8. Parámetros cinéticos del índice BI analizado para otros productos panificados.

Referencia	Producto	$t_{1/2}$ (s)	k_p ($10^3; s^{-1}$)	BI_{max}	R^2
Baik y col. (2000b)	Bizcochuelo	121.14	27.3	113	0.92
Yilmazer y col. (2011)	Muffin	1673,60	2.09	157	0.99
Kemerli y col. (2011)	Cookie	1184,72	2.92	116	0.99

Desde un punto de vista tecnológico, las cinéticas de desarrollo de color superficial sirven como criterio y punto de control en el proceso de horneado de este tipo de productos. Como se mencionó previamente, el color superficial de la corteza es un atributo de calidad importante, que frecuentemente se utiliza para caracterizar la duración del proceso de cocción (Chevallier y col., 2000; AitAmeur y col., 2007; Mundt y Wedzicha, 2007).

Un análisis conjunto de los perfiles de temperatura (sección 3.1.2) con las cinéticas de desarrollo de BI presentadas brinda una herramienta para determinar el tiempo de horneado. Si bien numerosos autores consideraron como criterio de corte el instante en el cual el centro térmico del producto alcanza 95-98°C (Olszewski, 2006; Le-Bail y col., 2009), Purlis (2012) en su estudio del proceso de horneado de pan indicó que al alcanzar esa temperatura el producto aun no adquirió las características sensoriales y de calidad deseadas, como color superficial y un desarrollo adecuado de su estructura. Por lo cual, este tiempo es característico de una cocción parcial de pan, frecuentemente utilizada en el caso de pan precocido congelado.

Por ejemplo, para el caso particular de madalenas horneadas bajo CF1, el tiempo mínimo de cocción es 475 segundos (tabla 3.4). Ingresando con este valor a la ecuación 3.8 obtenemos un color de corteza caracterizado por un $BI=81$, valor demasiado claro según la figura 3.10, y el producto no puede considerarse óptimo desde el punto de vista de calidad final. Resultados similares se obtuvieron al analizar el resto de las condiciones operativas estudiadas en este trabajo.

De esta manera, desde un punto de vista de calidad cabe analizar cuál es el valor de color óptimo percibido por el consumidor y cuál es el tiempo necesario para lograr esta característica, el cual dependerá de la condición operativa.

3.1.5 Determinación de color óptimo

A partir de las cinéticas previamente descriptas y del análisis sensorial realizado particularmente para evaluar el color superficial del producto (descrito en la sección 2.5.1.1), se determina el valor de color óptimo.

La aplicación de análisis de supervivencia a los resultados del estudio sensorial permite encontrar las funciones rechazo, las cuales se construyen cuantificando la cantidad de

consumidores que rechazan el producto por ser muy claro (R_c) y la cantidad de consumidores que lo rechazan por ser muy oscuro (R_o) utilizando el software R 3.0.1.

A modo de ejemplo se presentan en la tabla 3.9 las respuestas de cinco consumidores ya codificadas, listas para ingresar al programa. Las mismas se interpretan de la siguiente manera: valor 1 - el color superficial fue señalado como muy claro; 0 - el color superficial es adecuado y por último, 2 - el color superficial fue calificado como muy oscuro.

Tabla 3.9. Codificación utilizada para procesar los resultados con análisis de supervivencia.

Consumidor n°	BI=67	BI=81	BI=105	BI=116	BI=126
1	1	1	0	0	2
2	1	1	1	0	2
3	1	0	0	2	2
4	1	1	1	0	0
5	1	1	0	0	0

De esta manera fueron ingresadas las respuestas de todo el panel consultado analizando, por un lado la transición de “Muy claro” a “Ok”, y por otro la transición de “Ok” a “Muy oscuro” es decir, los dos eventos por separado.

Una vez obtenidos los valores experimentales para cada evento se analizan distintos modelos de ajuste matemático, como se mencionó en el capítulo 2. En este sentido, el modelo paramétrico que mejor representa estas funciones es el de weibull. Las funciones rechazo R_c y R_o obtenidas se presentan en las ecuaciones 3.11 y 3.12, respectivamente.

$$R_c = 1 - \exp \left[-\exp \left(\frac{\ln(BI) - \mu}{\sigma} \right) \right] \quad (3.11)$$

$$R_o = \exp \left[-\exp \left(\frac{\ln(BI) - \mu}{\sigma} \right) \right] \quad (3.12)$$

donde μ y σ son las constantes propias del modelo, las cuales resultan 4.541 ± 0.040 y 0.124 ± 0.029 para R_c y 4.806 ± 0.012 y 0.034 ± 0.009 para R_o , respectivamente.

Las funciones rechazo R_c y R_o se presentan en la figura 3.14.

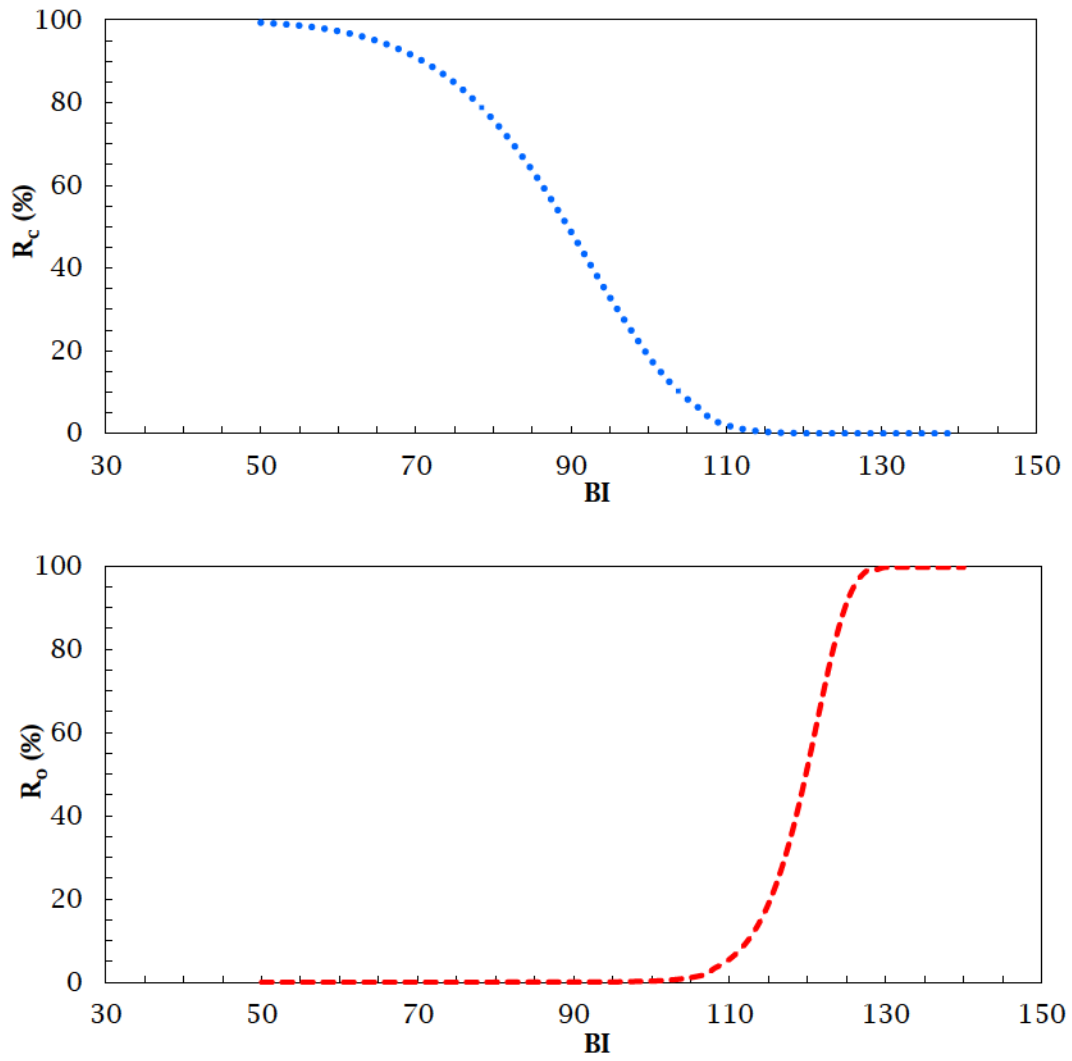


Figura 3.14. Funciones rechazo R_c y R_o , según las ecuaciones 3.9 y 3.10, respectivamente.

De la suma de las funciones 3.9 y 3.10 es factible expresar una función rechazo global (figura 3.15).

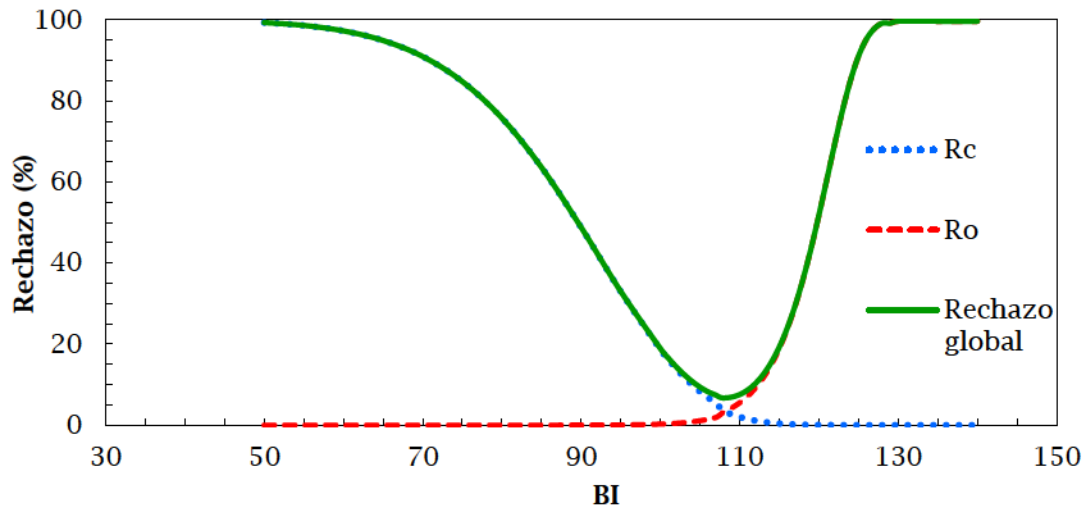


Figura 3.15. Funciones R_c (línea punteada azul), R_o (línea partida roja) y rechazo global (línea verde).

Finalmente, el valor de color superficial óptimo se determina buscando el valor mínimo de la curva de rechazo global, el cual corresponde a un valor BI igual a 108 ± 2 asociado a un 6.7 % de porcentaje de rechazo. Es decir, de los 50 consumidores consultados, solo 3 rechazaron este producto por ser o muy claro o muy oscuro.

Con este valor del índice BI y el modelo cinético de evolución de color propuestos en la sección anterior (ecuación 3.8 y tabla 3.7), es posible estimar el tiempo de horneado necesario para lograr el índice de color óptimo, el cual definimos como tiempo óptimo (t_{op}). La tabla 3.10 presenta dichos tiempos óptimos calculados para todas las condiciones operativas ensayadas. En todos los casos este tiempo resulta siempre mayor que el tiempo mínimo presentado en la tabla 3.4, asegurando una completa formación de la estructura interna.

Tabla 3.10. Valores de tiempos óptimos de cocción (t_{op} , s).

CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
2100	1700	1210	1030	710
CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
1560	960	720	580	470
CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
1700	1140	870	680	600

Adicionalmente, la figura 3.16 presenta la tendencia encontrada para el tiempo óptimo con respecto a la temperatura efectiva de operación. Como era de esperar, a medida que aumenta la

temperatura de operación, el tiempo óptimo disminuye. A su vez, al igual que informó para los otros tiempos característicos estudiados (t_{\min} y $t_{1/2}$) la dependencia también es de tipo exponencial ($R^2 > 0.94$) y los tiempos óptimos calculados para el modo de cocción convección natural se ajustaron en una curva (ecuación 3.13) distinta a la de los tiempos óptimos para los modos de convección forzada (ecuación 3.14).

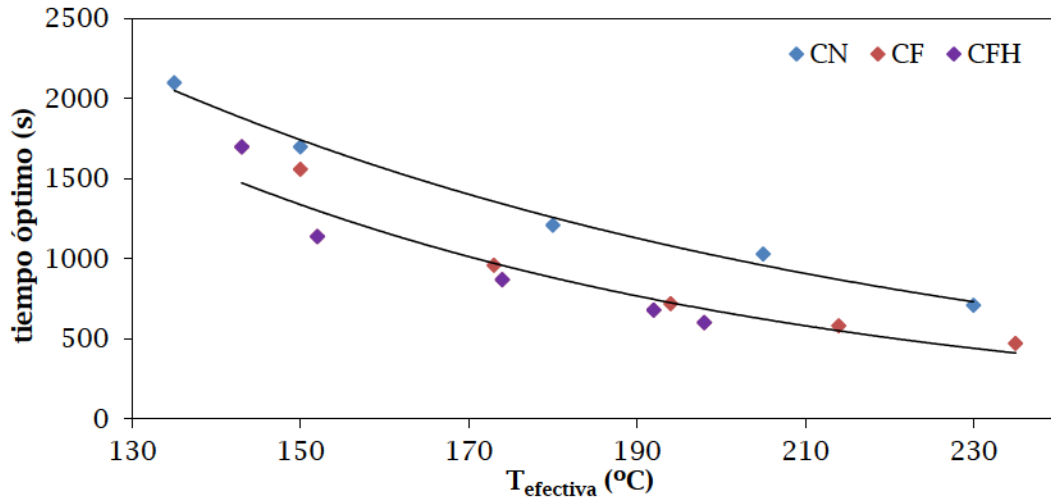


Figura 3.16. Dependencia de los tiempos óptimos de cocción calculados con T_{efectiva} .

$$\text{CN: } t_{op} = 8886 \exp(-0.011 T_{\text{efectiva}}) \quad (3.13)$$

$$\text{CF y CFH: } t_{op} = 10746 \exp(-0.014 T_{\text{efectiva}}) \quad (3.14)$$

3.1.6 Consumo de Energía

Previamente mencionamos la importancia que en los últimos años se le ha dado al consumo energético. No solo con el objetivo de minimizar el costo operativo de los procesos, sino porque la regulación internacional está obligando a los productores de alimentos que reduzcan la llamada “huella de carbono” responsable en gran parte del conocido calentamiento global. Esto alienta al estudio y análisis de los procesos en vistas de la introducción de “tecnologías verdes” en sectores de la industria donde la demanda energética es importante (Khatir y col., 2013). Tal es el caso de la industria de panificados, particularmente del proceso de horneado.

Si bien este campo está en pleno desarrollo encontramos algunos antecedentes científicos publicados recientemente. En este sentido, Khatir y col. (2012, 2013) optimizaron la producción comercial de pan utilizando modelos matemáticos de análisis computacional fluidodinámico (CFD) validados experimentalmente de modo de mejorar la eficiencia de los hornos. Para esto tienen en cuenta no solo una optimización de los parámetros operativos (temperatura, coeficiente de transferencia, velocidad de circulación del aire), sino también las dimensiones

geométricas del equipo. El modelo permitió predecir el perfil de temperatura en el interior de la cámara de horneado y a su vez, se lo adaptó de modo de poder calcular la demanda de energía de equipos similares de distintas dimensiones. Alamir y col. (2013) propusieron un modelo para la transferencia de energía teniendo en cuenta el incremento de la temperatura interna, y las reacciones dependientes del mismo: gelatinización de almidón, formación de gluten y evaporación de agua durante la cocción de pan francés. Los autores validaron experimentalmente el modelo de manera de calibrar y ajustar el horno y las condiciones operativas utilizando circulación de aire dirigida a gran velocidad (jet impingement) con el propósito de lograr un mejor aprovechamiento de la energía.

En el presente trabajo se determina el consumo energético de un modo simple recurriendo a los perfiles experimentales de los hornos, de modo de incorporar este aspecto al estudio de las condiciones de horneado estudiadas. Los resultados presentados en esta sección apuntan a la optimización del consumo de energía mediante la planificación de las condiciones operativas, y no al diseño del equipo como sucede en los trabajos de literatura mencionados. Cabe mencionar que las demandas energéticas que en esta sección se determinan, solo cuantifican el consumo energético efectivo durante el proceso de cocción sin tener en cuenta los consumos de operaciones previas (como es el batido de los ingredientes y el calentamiento de la cámara de cocción).

El primer paso en este cálculo es la estimación del factor de uso adimensional (f) de cada horno, bajo cada condición ensayada, a partir de los perfiles de temperatura de los hornos ya presentados en la figura 3.2. Como se detalló en el capítulo 2, este factor f se calcula como el cociente entre el tiempo real de encendido ($t_{\text{encendido}}$) del equipo respecto del tiempo total de horneado según el criterio de corte (t_{min} y t_{op}).

En la práctica el tiempo de encendido total es la suma de todos los intervalos de tiempo en los cuales se observa un incremento de temperatura ambiente. Cabe mencionar que en este caso se consideraron los perfiles de temperatura de la cámara de cocción considerando como tiempo total de cocción el tiempo óptimo. A modo de ejemplo, dichos intervalos están indicados en la figura 3.17 correspondiente a una temperatura nominal de 140 °C para la condición CN.

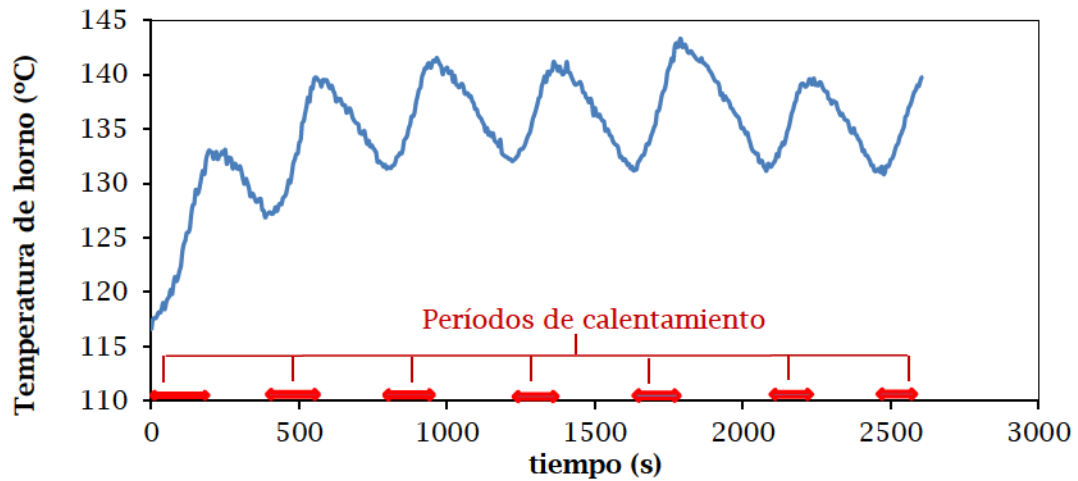


Figura 3.17. Perfil de temperatura señalando los intervalos de calentamiento de la cámara del horno bajo la condición CN1.

Este factor de uso f se presenta en la figura 3.18 para las quince condiciones ensayadas, en función de la temperatura efectiva. Se observa que para los tres modos de cocción (CN, CF y CFH), la funcionalidad de f vs. T_{efectiva} es lineal ($R^2 > 0.98$). Las ecuaciones 3.15, 3.16 y 3.17 permiten calcular el factor de uso para distintas temperaturas efectivas del horno, de acuerdo a la condición operativa.

Se ha encontrado que los valores del factor f son considerablemente mayores en todos los casos de convección natural. Por otro lado, al trabajar con convección forzada con humidificación, la vaporización de agua para humidificar el ambiente de horneado incide sensiblemente en los valores de f obtenidos y, por tanto, en el consumo de energía provocando un mayor consumo que en el caso de CF.

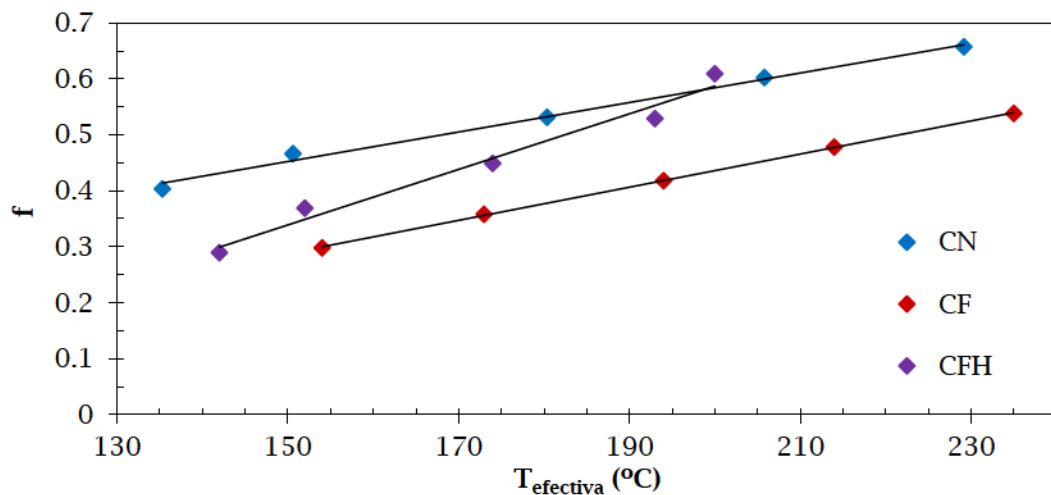


Figura 3.18. Factor f en función de la temperatura efectiva de operación.

$$\text{CN: } f = 0.003T_{\text{efectiva}} + 0.056 \quad (3.15)$$

$$\text{CF: } f = 0.003T_{\text{efectiva}} - 0.154 \quad (3.16)$$

$$\text{CFH: } f = 0.005T_{\text{efectiva}} - 0.406 \quad (3.17)$$

Luego de calcular y estudiar el factor de uso en cada caso y utilizando la ecuación 2.1 fue posible estimar el consumo energético para cada condición ensayada, haciendo un análisis distintivo entre los valores de consumo de energía correspondientes a los distintos tiempos de horneado establecidos previamente: t_{\min} y t_{op} . En la Tabla 3.11 se presentan los mismos para todas las condiciones operativas de cocción estudiadas.

Un primer análisis, considerando la cocción a t_{\min} (CEt_{\min}), muestra que bajo el modo convección natural el consumo disminuye apreciablemente cuando aumenta la T_{efectiva} (hasta un 30 %); en cambio bajo los dos modos de cocción con convección forzada (CF y CFH) prácticamente el CEt_{\min} no depende de la T_{efectiva} .

Por el contrario, cuando analizamos el consumo energético asociado a un tiempo de proceso óptimo definido por un criterio sensorial (CEt_{op}), la reducción del consumo al aumentar la T_{efectiva} es significativa en los tres modos de cocción (alrededor de un 44 - 46 %). Esto indica que si bien el factor de uso es mayor a mayor temperatura efectiva (figura 3.18), prevalece la disminución de los tiempos de cocción óptimos.

Tabla 3.11. Consumo energético de cada condición analizada bajo tiempos mínimos y tiempos óptimos de cocción.

	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
$\text{CEt}_{\min} (\text{J kg}^{-1})$	3961	3687	2772	2714	2768
$\text{CEt}_{\text{op}} (\text{J kg}^{-1})$	8445	7506	6269	6012	4570
	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
$\text{CEt}_{\min} (\text{J kg}^{-1})$	1313	1196	1288	1250	1188
$\text{CEt}_{\text{op}} (\text{J kg}^{-1})$	4313	3147	2768	2543	2327
	CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
$\text{CEt}_{\min} (\text{J kg}^{-1})$	2365	2091	2377	2400	2391
$\text{CEt}_{\text{op}} (\text{J kg}^{-1})$	7378	5418	4982	4472	4099

3.2. Determinación y análisis de parámetros de calidad de madalena

Estas determinaciones son realizadas en madalena horneada al tiempo óptimo de cocción (determinado en la sección 3.1.5) para cada condición operativa estudiada.

3.2.1 Pérdida de peso

Fundamentalmente la pérdida de peso hace referencia a la cantidad de agua que se evapora desde el producto hacia la cámara de horneado. Por lo cual conocer la evolución de este parámetro durante el proceso permite analizar en mayor profundidad el conjunto de reacciones responsables de la migración de agua.

En la figura 3.19 se presenta la evolución del contenido de agua en base seca, la cual deriva de la pérdida de peso registrada para las muestras durante el horneado, para todas las condiciones ensayadas.

La posibilidad de registrar la pérdida de peso durante los primeros instantes del proceso (registro on-line CF) permite observar que el fenómeno comprende tres períodos. En el primero, el cual es muy breve, el contenido de agua prácticamente no varía. Seguidamente, comienza un período continuo de deshidratación durante el cual la velocidad de secado permanece constante y hacia el final de la cocción, esta velocidad decae considerablemente.

Del análisis conjunto de los resultados y los perfiles de temperatura interna presentados previamente (figura 3.4), se observa que la duración del primer período coincide con la primera etapa de inducción, en la cual la temperatura interna de la madalena varía muy poco, luego la etapa de velocidad de secado constante coincide con el período en el cual la temperatura interna aumenta hasta que alcanza el valor de estabilización alrededor de los 102 °C. Un análisis similar de los resultados fue reportado por Lostie y col. (2002) durante la cocción de bizcochuelo.

Para completar este análisis se calculó la pérdida de peso al final del proceso de cocción (base húmeda, b.h.) para todas las condiciones ensayadas. Los valores de dicho parámetro figuran en la tabla 3.12. Estos se encuentran en un rango de [11.2 - 12.0] %, [12.9 - 14.6] % y [11.8 - 14.7] % para CN, CF y CFH, respectivamente. Ambos modos de convección forzada presentan mayores valores de pérdida de peso que la cocción CN. Estos resultados pueden explicarse considerando la transferencia de materia convectiva responsable de la deshidratación superficial. Los coeficientes de transferencia de materia involucrados en este proceso están íntimamente relacionados con los coeficientes de transferencia de calor previamente detallados.

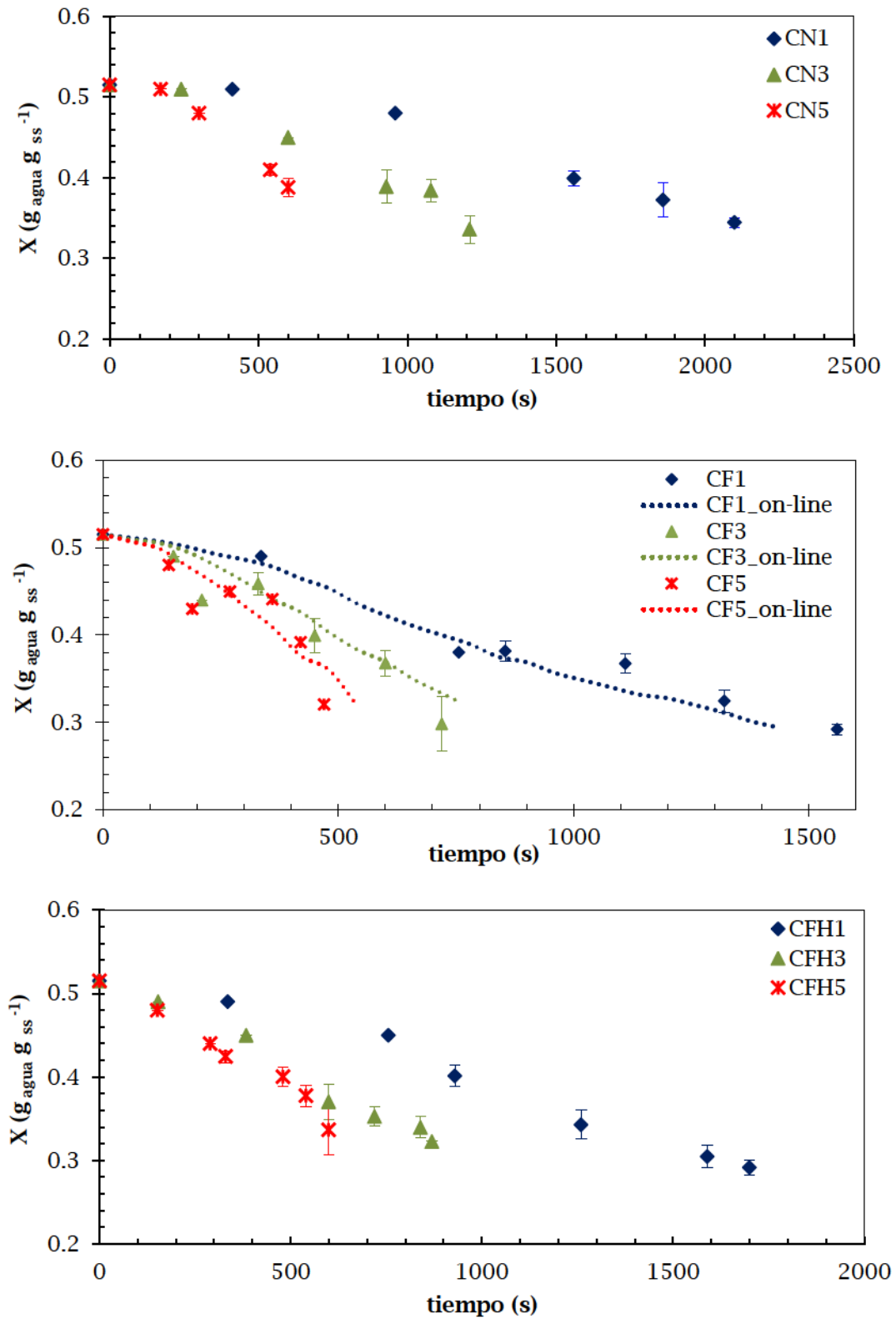


Figura 3.19. Evolución del contenido de humedad (b.s.) durante la cocción de madalena.

A su vez los resultados muestran que al aumentar la temperatura de operación en ambos modos de convección forzada disminuye la pérdida de peso. Este comportamiento se atribuye a los menores tiempos de horneado que estas condiciones requieren.

Martínez-Cervera y col. (2012), en su estudio de las propiedades reológicas, texturales y sensoriales de madalenas preparadas con bajo contenido de sacarosa, procesadas en un horno eléctrico a 175°C durante 17 minutos, informaron valores de pérdida de peso similares a los determinados en el presente trabajo. Por su parte, Lara y col. (2011) también encontraron valores de pérdida de peso entre 12 y 15 % al final del proceso de cocción de pequeñas tortas de maíz horneadas en un horno de convección natural operando a distintas temperaturas (190, 210, 230 y 250 °C) durante 45 minutos.

Tabla 3.12. Pérdida de peso (% b.h.) medida al final del proceso de horneado de madalenas.

CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
11.2 ± 0.6	12.0 ± 1.3	11.8 ± 0.6	12.0 ± 0.3	10.1 ± 0.4
CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
14.7 ± 1.1	14.2 ± 0.5	14.3 ± 0.9	13.5 ± 0.5	12.9 ± 0.6
CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
14.7 ± 1.1	13.1 ± 0.7	12.7 ± 0.5	11.2 ± 0.9	11.8 ± 0.8

3.2.2 Análisis de la corteza y de la miga

En general, en los productos panificados se distinguen dos regiones bien diferenciadas: corteza y miga. De acuerdo a lo observado en los ensayos realizados en este trabajo, tan pronto el producto es situado en el horno, la capa superficial comienza a secarse y es evidente la formación de la corteza. La importancia de ésta en la calidad final del producto (Wagner y col., 2007) justifica el análisis por separado de estas dos regiones.

3.2.2.1 Contenido de humedad

La figura 3.20 muestra la evolución del contenido de humedad de la corteza y de la miga monitoreado a lo largo de la cocción bajo CN1 (horneados parciales). Puede diferenciarse claramente el comportamiento de las dos regiones que componen el producto: la zona interna (miga) mantiene la humedad de la mezcla inicial, mostrando solo un pequeño descenso (de 34 a 31 %, b.h.) al final del proceso. Por el contrario la zona superior de la madalena sufre una importante deshidratación durante todo el proceso, llegando a valores de humedad tan bajos como 10 % (b.h.). Gracias a esta característica, la corteza funciona como barrera a la transferencia de masa previniendo el avance de la deshidratación de la miga, como fue

comprobado para otro tipo de productos panificados (Purlis y Salvadori, 2009b). Sin embargo esta barrera no es total, como se aprecia en los resultados, dado que la corteza es una estructura abierta y porosa, aunque más compacta que la miga (Altamirano-Fortoul y col., 2012).

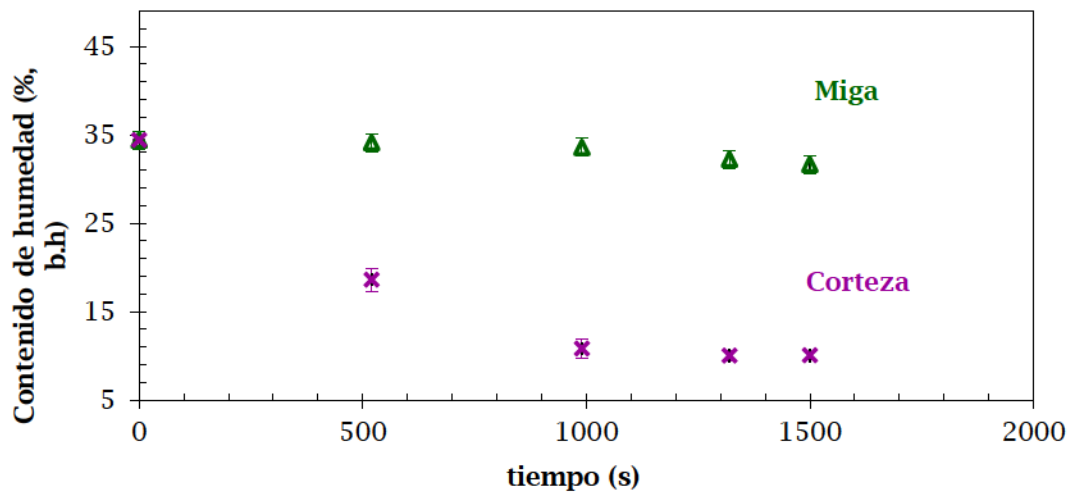


Figura 3.20. Evolución de contenido de humedad en la miga y en la corteza.

Siguiendo con la caracterización de estas dos regiones por separado, determinamos el contenido de humedad al final del proceso de cocción para todas las condiciones estudiadas. Los resultados se presentan en la tabla 3.13.

Particularmente, el contenido de humedad de la miga no está influenciado por la temperatura de horneado. Los rangos de variación son menores a 1.2 %. Tanto para CN como para CFH la humedad de la miga fue alrededor de 33 % (b.h.), mientras que para CF fue sensiblemente menor, 31 % (b.h.).

En cambio, el contenido de humedad de la corteza es significativamente menor que el de la miga en todas las condiciones operativas ensayadas. Además se encuentran diferencias en cuanto al comportamiento de este parámetro entre los distintos modos operativos y las temperaturas ensayadas. En primer lugar los valores obtenidos para las muestras procesadas bajo el modo CN no presentan diferencias significativas al comparar las distintas temperaturas de operación; si bien los valores promedio van de 12 a 9.7 % (b.h.) éstos poseen una dispersión importante. Por otro lado, las muestras obtenidas bajo CF, presentan mayor contenido de humedad en la corteza al aumentar la temperatura de operación (de 10 a 12.7 %, b.h.). En este caso, la deshidratación de la corteza está gobernada por el tiempo, ya que a mayor temperatura, los tiempos de operación disminuyen considerablemente, resultados que se correlacionan con el comportamiento de la pérdida de peso observada bajo este modo convectivo. Finalmente, para las muestras obtenidas bajo CFH, el efecto de inyectar vapor

durante el horneado produce un contenido de humedad de la corteza independiente de la temperatura de operación, con un valor promedio de 11.7 % (b.h.).

Tabla 3.13. Contenido de humedad (% b.h.) en la corteza y en la miga de madalena.

	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
corteza	12.0 ± 0.6	11.0 ± 0.6	11.4 ± 1.5	9.6 ± 2.0	9.7 ± 2.7
miga	32.5 ± 0.4	33.0 ± 0.5	33.5 ± 0.2	33.0 ± 0.1	33.7 ± 0.1
	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
corteza	10.0 ± 0.5	10.8 ± 0.6	11.4 ± 0.7	11.5 ± 0.8	12.7 ± 0.2
miga	31.6 ± 0.5	31.9 ± 0.5	31.4 ± 0.8	31.4 ± 0.5	31.7 ± 0.4
	CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
Corteza	12.7 ± 1.1	11.1 ± 0.8	11.3 ± 1.0	12.7 ± 0.6	11.3 ± 2.0
miga	33.4 ± 0.1	33.2 ± 0.2	33.3 ± 0.2	33.6 ± 0.1	33.3 ± 0.1

3.2.2.2 Relación corteza/miga y espesor de corteza

De modo de continuar el análisis de la corteza y de la miga del producto final, se cuantifica la relación en masa de estas dos regiones para madalenas horneadas bajo las distintas condiciones (tabla 3.14).

Particularmente estos resultados muestran los beneficios de operar con la cámara de horneado con humedad relativa más alta (inyección de vapor) manifestándose en valores muy bajos de la relación corteza/miga, independientemente de la temperatura de horneado. Resultados similares fueron informados por Le Bail y col. (2011), en un estudio en el cual analizaban el efecto de inyectar distintos volúmenes de vapor durante el horneado de pan.

Por otro lado, el aumento de la temperatura operativa en los modos CN y CF provoca una disminución de la relación corteza/miga. Se atribuye esta tendencia a la disminución de los tiempos de proceso.

Complementando la discusión se analiza la influencia del modo de operación comparando condiciones que presentan similares temperaturas efectivas. Por ejemplo, las condiciones operativas CN2, CF1 y CFH2, para las cuales la temperatura efectiva es 150.6, 154.0 y 151.7 °C, respectivamente. De la tabla 3.14 se lee que los valores de relación corteza/miga resultan 0.15, 0.21 y 0.07, respectivamente, indicando que el modo CF provoca un desarrollo de corteza significativamente mayor.

Tabla 3.14. Relación corteza/miga (g/g) de madalena.

CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
0.16 ± 0.004	0.15 ± 0.014	0.15 ± 0.007	0.15 ± 0.006	0.12 ± 0.006
CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
0.21 ± 0.020	0.16 ± 0.004	0.15 ± 0.013	0.16 ± 0.009	0.14 ± 0.010
CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
0.08 ± 0.003	0.07 ± 0.001	0.06 ± 0.004	0.07 ± 0.001	0.07 ± 0.002

Si bien no contamos con antecedentes en bibliografía que realicen esta determinación para este producto, encontramos que Le Bail y col. (2010) informaron una relación corteza/miga de 0.2 para el modelado de la demanda de energía del proceso de cocción de pan blanco.

Asimismo se determina el espesor de corteza mediante un ensayo no destructivo: ultrasonido de baja densidad (ecografía). Ilustrando esta técnica la figura 3.21 muestra las imágenes obtenidas al analizar muestras de madalena, distinguiéndose claramente la corteza superficial de color blanco. Los resultados obtenidos para las distintas condiciones operativas estudiadas, se detallan en la tabla 3.15. En general se observa que la inyección de vapor genera un menor espesor de corteza, en algunos casos hasta un 15 y 20 % menos que para los modos CF y CN, respectivamente.

Realizando un análisis con mayor detenimiento, en primer lugar se observa que el espesor de corteza para muestras horneadas bajo el modo convección natural es afectado por la temperatura de operación, disminuyendo con el aumento de esta variable, lo cual apunta a una influencia directa del tiempo de horneado. Cabe remarcar que para este modo en particular, al aumentar la temperatura nominal de 140 a 180 y 220 °C, el tiempo de cocción (t_{op}) disminuye en un 42 y 66 %, respectivamente. Este comportamiento se verifica también en las muestras obtenidas con convección forzada, sin embargo en este caso no se encontraron diferencias significativas entre el espesor de corteza medido para las dos temperaturas mayores (CF3 y CF5) indicando un efecto combinado de la temperatura y el tiempo de cocción.

Finalmente para el modo de cocción de convección forzada con inyección de vapor observamos que el espesor de corteza no presenta diferencias significativas respecto de la temperatura de horneado.



Figura 3.21. Ecografía de madalena.

Tabla 3.15. Espesor de corteza (mm) de madalena.

CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
1.71 ± 0.04	----	1.47 ± 0.11	----	1.27 ± 0.08
CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
1.62 ± 0.12	----	1.51 ± 0.08	----	1.54 ± 0.08
CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
1.26 ± 0.13	----	1.35 ± 0.17	----	1.35 ± 0.13

Previamente se ha mencionado que en general los productos estudiados en la presente tesis se caracterizan por tener un bajo espesor de corteza respecto de otros panificados, por ejemplo pan. En este sentido, en la bibliografía se informan espesores de corteza de pan que alcanzan el doble de los valores detallados en la tabla 3.15 (Zanoni y Peri, 1993; Jefferson y col., 2007; Wagner y col. 2008).

3.2.3 Propiedades estructurales

3.2.3.1 Porosidad de la miga

La estructura interna de los alimentos es consecuencia de los ingredientes utilizados y de las reacciones que ocurren durante su procesamiento. Particularmente la estructura de los cereales y alimentos derivados ha sido estudiada en los últimos años mediante análisis de imágenes (Kocer y col., 2007; Mohd y col., 2009).

Durante el horneado las burbujas de aire incorporadas durante el batido se transforman en poros los cuales quedan inmersos y conforman la matriz final del panificado (Martínez-Cervera y col., 2012).

Como se ha definido en la sección 2.4.3 la porosidad mide el número de poros por unidad de área. En la tabla 3.16 se presentan los resultados de porosidad de la miga promedio de madalenas horneadas bajo todas las condiciones estudiadas.

Tabla 3.16. Porosidad de la miga (cel cm^{-2}) de madalena.

CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
12.3 ± 0.6	10.6 ± 0.8	8.0 ± 0.9	7.4 ± 1.0	7.1 ± 0.7
CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
9.14 ± 1.2	11.2 ± 0.6	12.6 ± 0.6	12.9 ± 0.9	11.4 ± 0.5
CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
6.9 ± 1.0	7.4 ± 1.2	8.1 ± 1.1	8.7 ± 1.3	8.3 ± 1.0

En primer lugar, para los productos horneados bajo el modo convección natural, se observan diferencias significativas entre los valores de porosidad de la miga para CN1 y CN2, las cuales en promedio presentan mayor cantidad de poros por unidad de área (11.4 cel cm^{-2}) comparadas con el resto de las condiciones (CN3, CN4 y CN5, 7.5 cel cm^{-2}).

Para enriquecer la discusión se presentan a modo de ejemplo imágenes de la miga característica de madalenas obtenidas bajo convección natural (figura 3.22). Se observa que la miga obtenida en condiciones de menor temperatura de horneado (mayor porosidad) posee una distribución uniforme en cantidad y tamaño de poros. En cambio, cuando el horneado se realiza a mayor temperatura, se visualiza aglomeración de poros en burbujas de aire de gran tamaño y en algunos casos incluso se distinguen canales (resaltados en la figura 3.22).

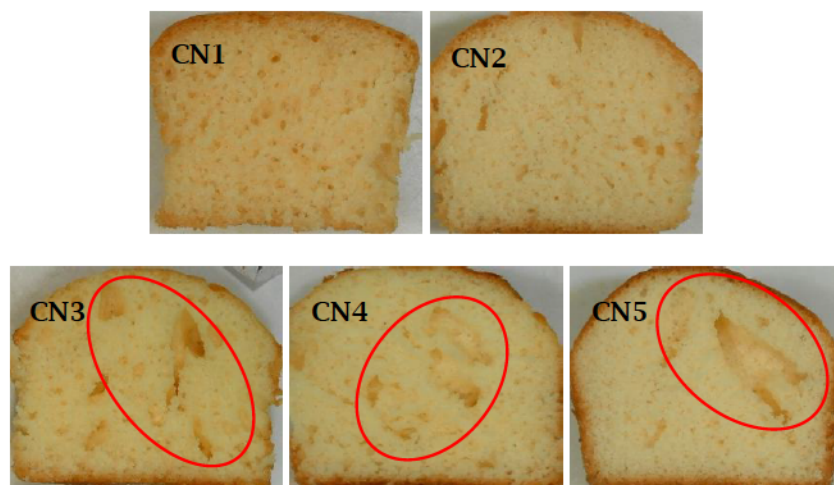


Figura 3.22. Miga de madalenas horneadas bajo CN.

Por otro lado para los modos CF y CFH no encontramos una tendencia clara que indique la influencia de la temperatura de operación en la porosidad de las muestras. No obstante, el modo de horneado sí afecta las características de la miga, quedando en evidencia en los valores promedio de porosidad 11.4 y 7.9 cel cm², para CF y CFH, respectivamente.

En la figura 3.23 se presentan imágenes de la miga de madalenas obtenidas bajo el modo CF. En todas ellas se distinguen poros de gran tamaño y poros pequeños distribuidos de forma irregular. Una tendencia similar fue observada en imágenes de miga de madalenas obtenidas bajo el modo CFH (figura 3.24), sin embargo en este caso la coalescencia de poros es menor.



Figura 3.23. Miga de madalenas horneadas bajo CF.

Este comportamiento observado fue reportado por Zhang y col. (2007). Los autores hallaron una estrecha relación entre la forma y distribución de los poros de la miga con la formación de la corteza. Una formación temprana de esta zona superficial deshidratada, restringe la expansión del volumen del panificado, lo cual provoca detrimento mecánico sobre ciertas zonas débiles de la miga, desencadenando menor porosidad y coalescencia de poros. En las secciones previas hemos descrito la transferencia de calor en el interior del producto y el desarrollo de color superficial directamente ligado a la formación de la corteza. Los resultados concuerdan: para los modos CF y CFH se informó mayor velocidad de calentamiento y mayores valores de la constante de velocidad de la cinética de pardeamiento (k_p), en consecuencia una formación de corteza temprana en el producto la cual restringe la expansión y provoca este tipo de distribución de poros.

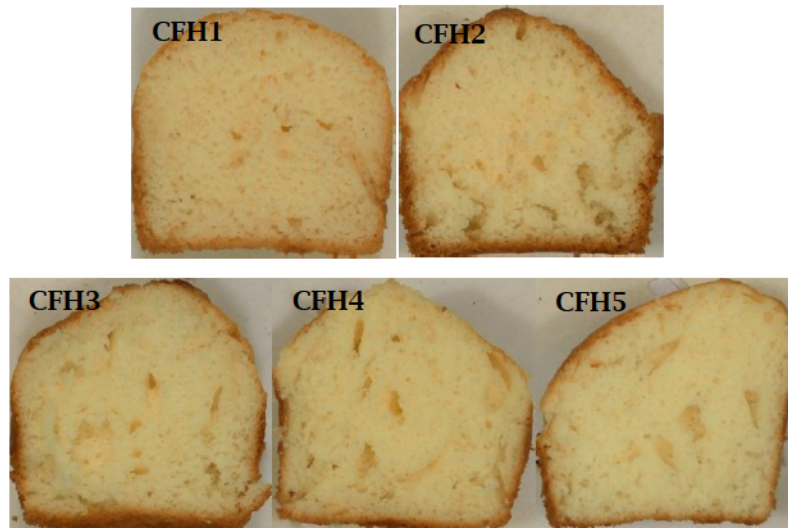


Figura 3.24. Miga de madalenas horneadas bajo CFH.

Tanto en la práctica experimental, como mediante el análisis de las imágenes, se visualiza que las madalenas obtenidas bajo el modo CN, presentan una forma redondeada, uniforme y pareja. En cambio, para las condiciones CF y CFH, la superficie por lo general tiene una curvatura pronunciada (forma en punta) menos uniforme, siendo esta característica más evidente en las muestras horneadas bajo el modo CF. En este sentido, Baik y col. (2000) informaron una gran influencia de la velocidad de circulación del aire en la cámara de horneado sobre la forma del producto, en condiciones donde este parámetro aumentaba, la superficie resultaba con una forma tipo cono o en punta.

3.2.3.2 Densidad global y de miga

En la tabla 3.17 se informan los valores de densidad global y de miga para todas las condiciones estudiadas. Respecto de la densidad global no se encuentran diferencias significativas entre muestras horneadas a distintas temperaturas y con distintos modos convectivos. Los valores promedio de densidad global son 497 ± 27 ; 511 ± 38 y $498 \pm 32 \text{ kg m}^{-3}$ para CN, CF y CFH respectivamente.

Por otro lado, se observa un aumento de la densidad de miga con el aumento de la temperatura de operación para las muestras obtenidas bajo los modos CN y CF. No sucede así para la condición de horneado con vapor en la cámara de cocción (CFH), donde se determina que no hay diferencias significativas entre los resultados correspondientes a distintas temperaturas de operación.

Del análisis de los resultados surge la importancia de diferenciar ambos parámetros, ya que no presentan el mismo comportamiento. La densidad global es afectada fundamentalmente por la deshidratación que sufre el producto (WL), fuertemente ligada a la formación de corteza, y a

la expansión volumétrica global. Por otro lado, la densidad de miga depende fuertemente del modo en que se conforma la matriz porosa en el interior del producto.

Tabla 3.17. Densidad global y de miga (kg m^{-3}) de madalena.

	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
ρ	505 ± 20	492 ± 32	486 ± 25	500 ± 54	501 ± 25
ρ_m	431 ± 31	478 ± 50	509 ± 12	502 ± 19	536 ± 18
	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
ρ	498 ± 31	513 ± 30	526 ± 30	511 ± 51	510 ± 40
ρ_m	440 ± 30	490 ± 10	470 ± 10	510 ± 10	580 ± 20
	CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
ρ	500 ± 20	490 ± 50	512 ± 30	490 ± 30	492 ± 30
ρ_m	460 ± 34	469 ± 45	456 ± 28	477 ± 79	460 ± 37

3.2.3.3 Textura

Para los productos estudiados en la presente tesis la textura es otra propiedad fundamental para definir la calidad. Sin embargo y dado que la textura se cuantifica a través de diferentes parámetros: firmeza, cohesividad, gomosidad, entre otros, no existe una única definición que indique el rango en el cual estos parámetros son positivos o dejan de serlo. Por lo general esta determinación debe ser acompañada de otras determinaciones instrumentales o sensoriales (Zghal y col., 2002; Szczesniak, 2002; Scholtz y Bosman, 2005; Cauvain y Young, 2006).

En el presente trabajo se realizaron ensayos de análisis de perfil de textura (TPA) y de relajación de la miga de madalena horneadas bajo todas las condiciones ensayadas. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 3.18.

Al analizar cada modo convectivo por separado no se observa una tendencia clara entre los parámetros de textura y la temperatura de operación. En cambio sí se encuentran diferencias al comparar los distintos modos convectivos de operación.

Tabla 3.18. Firmeza (F), cohesividad (C), y elasticidad (λ) de la miga de madalena.

	CN1	CN2	CN3	CN4	CN5
F (N)	3.2 ± 0.08	3.1 ± 0.02	2.2 ± 0.09	3.0 ± 0.40	3.0 ± 0.30
C	0.6 ± 0.03	0.6 ± 0.02	0.7 ± 0.04	0.6 ± 0.01	0.6 ± 0.02
λ (s)	15.5 ± 0.90	15.5 ± 0.80	15.7 ± 0.70	13.3 ± 0.30	15.4 ± 0.60
	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5
F (N)	5.0 ± 0.90	5.5 ± 0.30	5.1 ± 0.60	5.9 ± 1.00	5.5 ± 0.20
C	0.6 ± 0.08	0.5 ± 0.10	0.5 ± 0.02	0.5 ± 0.02	0.5 ± 0.03
λ (s)	13.9 ± 0.70	14.7 ± 0.90	15.8 ± 0.60	16.0 ± 1.00	13.9 ± 0.40
	CFH1	CFH2	CFH3	CFH4	CFH5
F (N)	3.3 ± 0.30	2.4 ± 0.38	1.5 ± 0.60	2.7 ± 0.03	3.3 ± 0.20
C	0.8 ± 0.02	0.7 ± 0.03	0.7 ± 0.10	0.7 ± 0.07	0.7 ± 0.01
λ (s)	12.1 ± 0.50	14.2 ± 0.50	12.8 ± 0.90	13.5 ± 0.40	14.5 ± 1.00

En primer lugar, los valores promedio de firmeza (N) son 2.7 ± 0.4 , 5.6 ± 0.8 y 3.1 ± 0.7 para las muestras horneadas bajo CN, CF y CHF respectivamente, indicando que la CF provoca una miga más firme. La cohesividad en todos los casos presenta valores entre 0.5 y 0.8, y con muy baja dispersión, señalando una buena integridad de la miga, que evita el desgranamiento de la misma (Güemes-Vera y col., 2009; Onyango y col., 2010). En cuanto al parámetro λ (elasticidad del producto) no se encuentra una influencia de la condición de operación sobre el mismo, siendo el valor promedio de 14.5 ± 0.9 (s).

Por último, si bien los resultados de gomosidad no se presentan en la tabla, los valores promedio de cada modo operativo son 1.8 ± 0.1 , 2.5 ± 0.5 y 1.8 ± 0.6 para la miga de madalenas obtenidas bajo CN, CF y CFH, respectivamente, repitiendo la tendencia de la firmeza, como es esperable.

Teniendo en cuenta estos resultados, pareciera en primera instancia que el horneado bajo convección forzada no favorece buenas características texturales de la miga de madalenas. Cabe remarcar que las muestras horneadas bajo CF presentan una distribución de poros no uniforme y de mayor tamaño (coalescencia), lo cual implica fenómenos de compresión y compactación en la matriz de la miga. En este sentido Gibson y Ashby (1982, 1997), quienes estudiaron de forma conjunta la estructura y las propiedades mecánicas de los sólidos porosos en general, señalaron que las propiedades mecánicas de este tipo de productos están fuertemente relacionadas con la distribución de las celdas de gas en la matriz del mismo, concluyendo que cuanto más uniforme es esta matriz, mejores propiedades mecánicas presenta el producto.

3.3 Aceptabilidad sensorial de madalena

El estudio de la percepción y aceptabilidad de la calidad de alimentos por parte de los consumidores es complejo e interdisciplinario, incluyendo áreas como ciencia y tecnología de los alimentos, nutrición, psicología y fisiología (Scholtz y col., 2005).

De acuerdo a la metodología detallada en el capítulo 2, se lleva a cabo una primera etapa de acercamiento a los consumidores habituales de este tipo de productos pidiéndoles que evalúen madalenas de marcas comerciales (figura 2.15). Los resultados de este estudio sensorial preliminar se presentan en la figura 3.25 en un gráfico de torta.

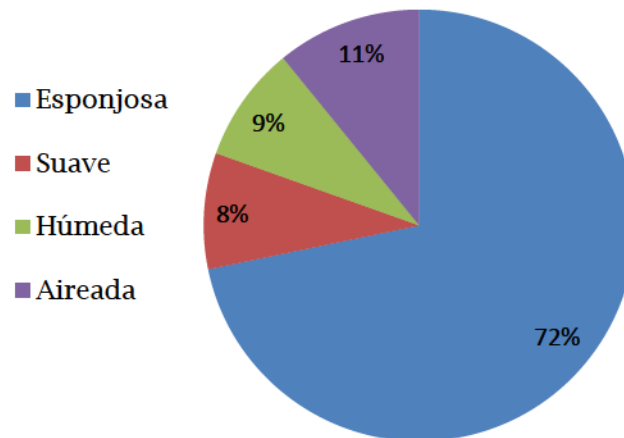


Figura 3.25. Características asociadas por los consumidores a las madalenas que mejor apreciaron.

Las muestras mejor ponderadas fueron las que presentaron menor firmeza, menor densidad y mayor porosidad. A su vez, analizando las respuestas del panel consultado respecto de las características más apreciadas, se encuentra que un alto porcentaje asoció la palabra “esponjosidad” como una característica positiva. Asimismo los términos “aireado”, “húmedo” y “suave” aparecieron repetidamente, pero con mucha menor frecuencia que el primero. Estos resultados nos permitieron enfocar el análisis sensorial de las muestras estudiadas en el presente trabajo de tesis a la consistencia de la miga (figura 2.16).

En la figura 3.26 se presentan los histogramas de aceptabilidad de consistencia de la miga. La primera observación general de estos resultados es que todas las muestras horneadas bajo el modo CN obtuvieron una mayor frecuencia de valoración positiva (puntuaciones entre 7 y 9). En cambio, las madalenas obtenidas bajo los modos CF y CFH presentan una distribución de clases más uniforme.

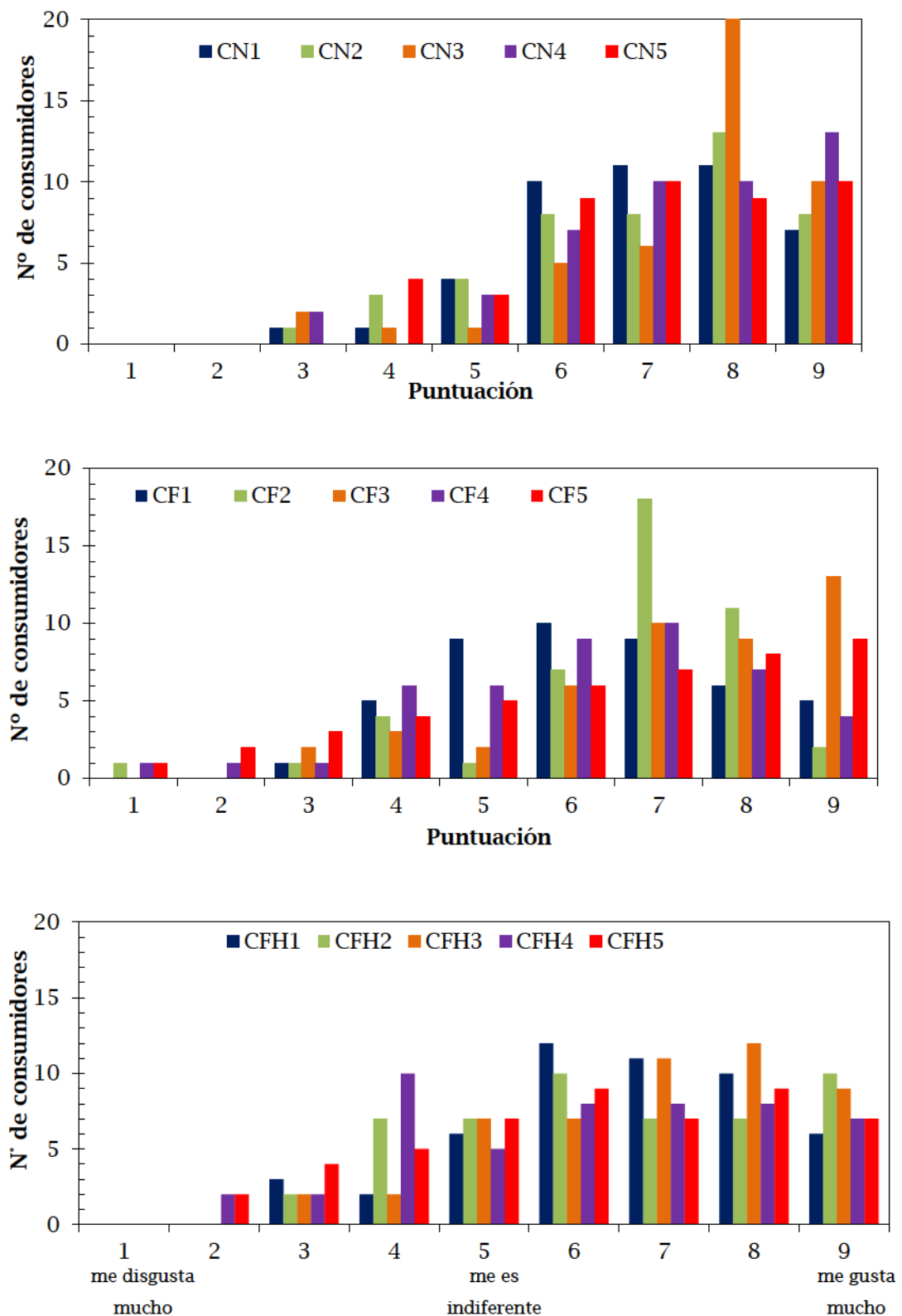


Figura 3.26. Histograma de aceptabilidad de la consistencia de la miga de madalena.

En general los consumidores prefirieron las muestras horneadas a temperaturas intermedias (temperaturas nominales de 160 y 180 °C para todos los modos convectivos). En cambio las mayores temperaturas de operación recibieron calificación negativa para los modos CF y CFH.

Finalmente, en la figura 3.27 se agrupan los resultados discriminados en la discusión previa mostrando el porcentaje de aceptabilidad para cada temperatura nominal y cada modo convectivo. Las muestras procesadas bajo el modo CN presentan el mayor porcentaje de aceptación para todas las temperaturas nominales (>75 %). En cambio al analizar los modos de cocción con convección forzada (CF y CFH) los consumidores prefirieron la consistencia de las muestras procesadas a temperaturas intermedias (160 y 180 °C).

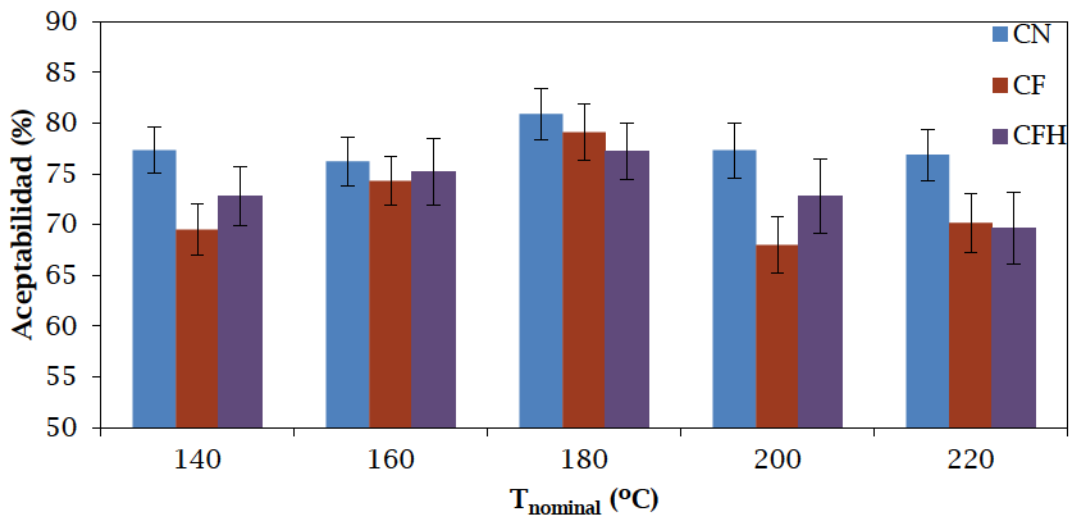


Figura 3.27. Aceptabilidad de la consistencia de madalena.

3.4 Conclusiones

En este capítulo se presentaron los resultados del estudio de la influencia de las condiciones de horneado (temperatura del horno, modo de convección, aporte de vapor de agua a la cámara de horneado) en distintos aspectos de la cocción de madalena.

En cuanto al desempeño de los equipos durante el proceso, la temperatura del interior de ambas cámaras de horneado presentó un comportamiento periódico, típico del control ON-OFF. La incorporación de vapor provocó dificultad al sistema de control para regular la temperatura, a su vez, el control del horno utilizado para el modo de convección natural fue más sensible.

Para caracterizar la expansión volumétrica de este producto se propuso una función de evolución de altura dependiente del tiempo y del radio de la misma que reproduce adecuadamente los valores de altura medidos experimentalmente.

Los perfiles de temperatura interna de madalena presentaron dos etapas: un periodo de calentamiento, donde la temperatura crece continuamente hasta alcanzar un valor de

estabilización y una etapa final en la cual se mantiene constante en un valor cercano a 100 °C. De estos perfiles se identificó el tiempo mínimo de cocción en el cual la miga de la madalena presentaba completamente desarrollada su estructura sólida porosa característica, pero no alcanzaba un desarrollo adecuado de la corteza. Este parámetro disminuyó significativamente con el aumento de la temperatura de horneado.

En términos generales, el modelo matemático de la transferencia de energía representó adecuadamente el comportamiento experimental. A partir de las historias térmicas simuladas se calculó el tiempo mínimo de cocción, el modelo presentó mayor precisión para el modo CN ($\varepsilon < 5\%$) que para ambos modos bajo convección forzada ($\varepsilon < 26\%$ y 18% para CF y CFH, respectivamente).

El color superficial del producto se cuantificó a través del índice BI. La cinética de pardeamiento pudo ser representada mediante un modelo logístico caracterizado por dos parámetros cinéticos: k_p y $t_{1/2}$, ambos dependientes de la temperatura efectiva de horneado.

La aplicación de estadística de supervivencia permitió definir el color óptimo en base a la aceptabilidad de los consumidores. Vinculando este color óptimo con el modelo cinético se calculó el tiempo óptimo de cocción.

Tanto el tiempo mínimo, el tiempo medio y el tiempo óptimo de cocción disminuyeron al aumentar la temperatura efectiva (dependencia exponencial) encontrando diferencias significativas entre el modo de convección natural y ambos modos de convección forzada.

Se estimó el consumo de energía en función de un factor de uso y del tiempo de cocción. El mismo siguió un comportamiento diferente de acuerdo al criterio utilizado para definir el punto de corte del proceso. La temperatura efectiva solo influyó significativamente en CEt_{min} para bajo el modo convección natural (disminuye hasta un 30% cuando aumenta $T_{efectiva}$). Por el contrario, al calcular CEt_{op} la reducción del consumo al aumentar $T_{efectiva}$ fue significativa en los tres modos de cocción (alrededor de un $44 - 46\%$) indicando que prevalece la influencia de la disminución de los tiempos de cocción óptimos.

En la evolución del contenido de humedad del producto durante el horneado se distinguieron tres períodos: el primero (muy breve) donde el contenido de agua prácticamente no varía, luego un período de deshidratación durante el cual la velocidad de secado permanece constante y por último un período de velocidad decreciente. En cuanto a la pérdida de peso al final de la cocción, como era esperable ambos modos de convección forzada provocaron mayor deshidratación. A su vez, al evaluar la evolución del contenido de humedad de la miga y de la corteza por separado, se comprobó que solo esta última sufre deshidratación considerable.

Las determinaciones de la relación corteza/miga y del espesor de corteza permitieron apreciar las ventajas de operar con inyección de vapor las cuales se manifestaron como menor cantidad y espesor de corteza en la madalena. Por el contrario, el modo CF presentó los

mayores niveles de relación corteza/miga. La temperatura de operación influyó en el espesor de corteza para los modos CF y CN.

Se encontró influencia de los modos convectivos en las características estructurales de la miga de madalena. En general, la condición CN favoreció un desarrollo de poros pequeños distribuidos uniformemente. Por el contrario los modos de convección forzada (CF y CFH) provocaron el desarrollo de poros de mayor tamaño (coalescencia) debido a las mayores velocidades de calentamiento y a la temprana formación de corteza, siendo más notorio este efecto para el modo CF. Este comportamiento y los resultados de los ensayos de textura (particularmente los valores de firmeza) señalaron que el modo de cocción CF fue el menos favorable para el desarrollo de una miga con características adecuadas.

Finalmente, los ensayos de aceptabilidad sensorial mostraron calificaciones positivas para todas las condiciones. Sin embargo las madalenas horneadas bajo las condiciones con convección forzada y a mayores temperaturas de operación, obtuvieron las menores puntuaciones verificando los resultados de los ensayos instrumentales.

CAPÍTULO 4

BIZCOCHUELO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bizcochuelo: Resultados y Discusión

El bizcochuelo es un tipo de masa esponjosa muy utilizada en repostería como base para elaborar tortas y pasteles. Los ingredientes básicos son la harina refinada (generalmente de trigo), huevos enteros, un agente leudante (químico), azúcar y/o una pequeña cantidad de sal.

La denominación bizcochuelo es tradicional en Uruguay, Argentina, Ecuador, Perú y Bolivia, y deriva de bizcocho, nombre que se le da a este producto en España. En Chile se lo conoce más comúnmente con el nombre de “keke” derivado de la denominación inglesa de bizcochuelo “cake”; en forma análoga en Colombia este producto se llama “panqué” derivado de la palabra inglesa “pound cake”.

En la actualidad el bizcochuelo es elaborado en distintos tamaños, formas, sabores y colores. Es un alimento consumido y asociado culturalmente con celebraciones como cumpleaños, bodas, y otros eventos importantes que ameritan reuniones familiares y de amigos.

El primer registro de elaboración de este producto fue encontrado en escritos egipcios donde se hacía referencia a elaboración de bizcochos dulces con miel. En la era medieval los panaderos producían esta clase de alimento con jengibre y frutas especialmente para las embarcaciones que debían pasar largos meses en alta mar, de modo de enriquecer la dieta de los marineros con los beneficios nutricionales de las frutas, altamente perecederas. Desde el siglo 17 existen registros de panaderos que se dedicaban a hacer este tipo de tortas decoradas con coberturas tipo glaseado. Recién en el siglo 19 comienzan a aparecer formulaciones

similares a las que se emplean en la actualidad, con harina refinada y levadura en polvo (Azcoytia, 2011).

En la figura 4.1 se presentan ejemplos de este tipo de producto que se encuentran en nuestro mercado local. Allí se observan distintos sabores, formas, tamaños e incluso una variante muy común, el producto ya particionado (ya sea en láminas para facilitar el relleno o en porciones individuales).



Figura 4.1. Distintas presentaciones de bizcochuelo disponibles en el mercado local.

El horneado, como lo es para madalena, es la instancia principal de cocción de bizcochuelo. Ambos productos consisten inicialmente en una mezcla compleja con numerosas celdas de aire y partículas de grasa dispersas en una fase acuosa continua. Durante el horneado gracias a los agentes leudantes de la mezcla, se desarrollan una gran cantidad de celdas de gas que aumentan su presión interna debido al incremento de temperatura dentro del producto (Kocer y col., 2007). A su vez, este calentamiento aumenta la presión parcial de vapor en la mezcla y favorece el desarrollo de las reacciones físico-químicas propias que hacen que esta mezcla se convierta en una estructura sólida porosa (gelatinización de almidón, desnaturalización de proteínas, caramelización de azúcares y reacción de Maillard). De esta manera, el proceso de horneado es clave para la conformación del producto final y, por tanto de su calidad.

En este capítulo se presentan los resultados de los distintos ensayos orientados a estudiar la influencia de las condiciones de cocción. El seguimiento de los parámetros característicos de proceso nos permitirá realizar un análisis completo e integral del producto.

4.1 Estudio fenomenológico del proceso de horneado de bizcochuelo

4.1.1 Perfiles de temperatura del horno

De modo análogo al análisis presentado en el capítulo 3, en este capítulo se discuten en detalle los perfiles de temperatura obtenidos experimentalmente en las distintas condiciones de horneado. En la figura 4.2 se muestran los perfiles de temperatura para cada condición de proceso ensayada. Cabe aclarar que en la presentación de estos resultados, del producto bizcochuelo, para diferenciarlos de los resultados del capítulo 3, se han identificado los modos de cocción (convección natural, convección forzada y convección forzada con humidificación) con CNb, CFb y CFHb.

Observamos en todas las condiciones una función periódica de esta variable con el tiempo (Andresen, 2013). Nuevamente en las experiencias realizadas con convección natural el rango de oscilación de la temperatura del horno es menor que para el resto de las condiciones. Esto se infiere claramente de la tabla 4.1, donde se presentan las temperaturas efectivas de operación para cada condición ensayada cuyos rangos de oscilación promedio son ± 4.4 , ± 5.8 y ± 6.4 °C para CNb, CFb y CFHb, respectivamente, confirmando que el equipo Ariston posee un sistema de control de la temperatura más sensible. A su vez, se observa la dificultad que provoca la inyección de vapor en el control de la temperatura de la cámara, el modo de cocción CFHb presenta ciclos de calentamiento y enfriamiento menos uniformes que el resto de las condiciones.

Tabla 4.1. Temperatura nominal y efectiva (°C) durante la cocción de bizcochuelo.

T_{nominal}	140	160	180
	CN1b	CN2b	CN3b
T_{efectiva}	145.4 ± 4.5	161.4 ± 4.7	185.8 ± 4.1
	CF1b	CF2b	CF3b
T_{efectiva}	150.2 ± 6.9	175.6 ± 4.9	194.0 ± 5.5
	CFH1b	CFH2b	CFH3b
T_{efectiva}	151.2 ± 6.3	166.2 ± 6.1	183.5 ± 6.7

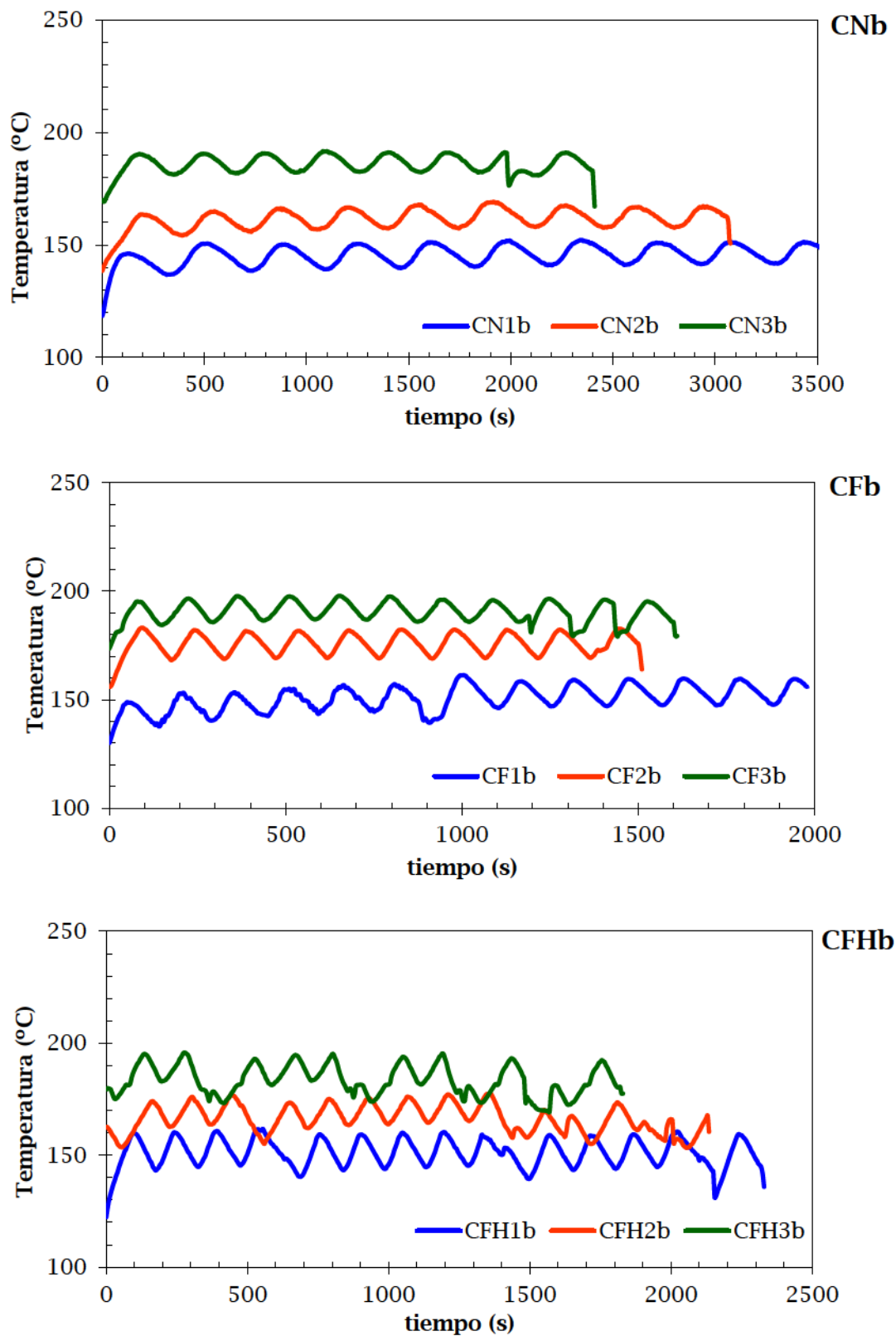


Figura 4.2. Perfiles de temperatura en el interior de la cámara de horneado durante la cocción de bizcochuelo.

Finalmente, si se comparan los valores promedio de temperatura T_{efectiva} para las mismas condiciones de horneado durante la cocción de ambos productos (tabla 4.1 vs. tabla 3.1) se encuentra que las mismas no presentan diferencias significativas. A su vez, la dependencia de T_{efectiva} con T_{nominal} (figura 4.3) es de tipo lineal ($R^2 > 0.99$).

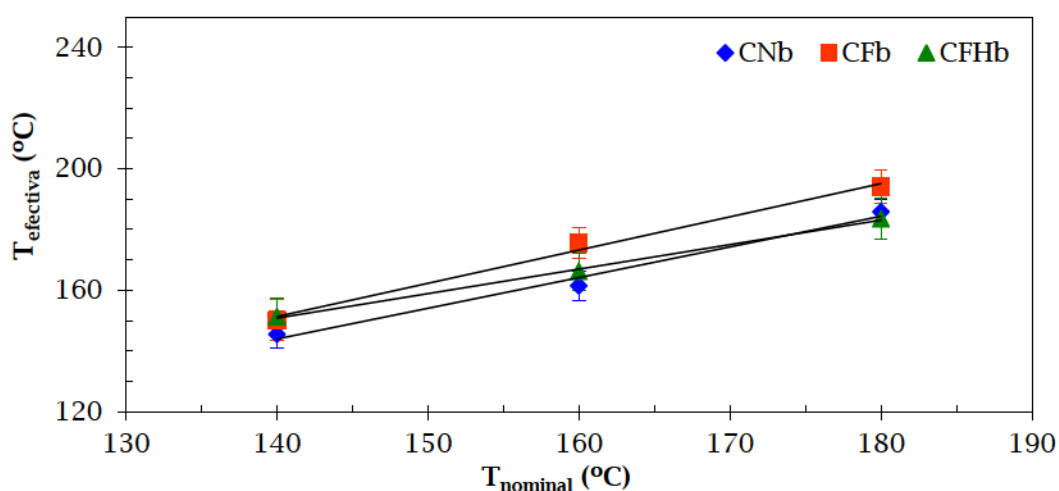


Figura 4.3. Temperatura efectiva del horno vs. temperatura nominal del horno, durante la cocción de bizcochuelo.

4.1.2 Expansión volumétrica

Previamente mencionamos que este tipo de productos experimentan un gran aumento de volumen durante el proceso de cocción. Si bien no se encuentran tantos antecedentes como para el caso de expansión volumétrica de pan (Rouillé y col., 2005; Purlis y Salvadori, 2010; Shehzad y col., 2010) algunos autores estuvieron trabajando en este campo en lo que respecta a bizcochuelo. Mizukoshi y col. (1980) estudiaron la expansión y la conformación de bizcochuelo como consecuencia directa del incremento de temperatura que experimenta el producto durante el horneado. Los autores proponen que inicialmente el volumen aumenta por expansión de las celdas de gas debido a un incremento de la presión de vapor en su interior. Una siguiente etapa de expansión comprende el aumento de tamaño de los gránulos de almidón que gelatinizan y las proteínas presentes coagulan. Como consecuencia la mezcla fluida comienza a gelificar, las celdas de gas quedan atrapadas y se conforma la matriz porosa.

Marcotte (2005) analizó la influencia de la cantidad de agentes leudantes en la generación y expansión de la estructura porosa durante el horneado de este producto. El autor a su vez, estudió el efecto de distintas temperaturas de operación, mayores a las estudiadas en la presente tesis (200, 225, 250, 275 y 300 °C) determinando también parámetros de calidad como firmeza, color y aceptabilidad sensorial. Como conclusión general el autor afirmó que el

aumento de la cantidad de agentes leudantes no siempre resulta en un incremento de volumen para este producto, pero provoca una disminución en la firmeza. Por otro lado encontró que un pequeño aumento de la temperatura de operación (225°C) provoca mayor expansión, pero si se sigue incrementando el efecto es el contrario.

Lara y col. (2011) realizaron el seguimiento de la expansión de torta de maíz durante el horneado filmando el proceso con una cámara digital. Los ensayos fueron realizados en un horno eléctrico a cuatro temperaturas de operación distintas: 190, 210, 230 y 250 °C. Los autores encontraron que la expansión de la muestra comenzaba luego de un período de retardo, cuya duración dependía de la temperatura de operación, y que el comienzo de la expansión coincidía con el instante en el cual la temperatura interna alcanzaba 45/50 °C.

En este trabajo se registró la evolución de la altura del producto durante el tiempo de horneado. Las medidas fueron tomadas en cuatro posiciones radiales de la muestra siguiendo la metodología ya detallada en el capítulo 2. Las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 presentan los registros experimentales para cada condición ensayada y para cada posición radial (r0: centro; r3.5, r6.5 y r9: distintas posiciones correspondientes a las varillas del molde utilizado, figura 2.6).

En todas las condiciones operativas encontramos la misma tendencia: la evolución de altura sigue un comportamiento de tipo sigmoideo: inicialmente permanece constante (fase lag o retardo), luego comienza un aumento gradual y continuo hasta un valor cercano al valor final, y por último se estabiliza. Se observa asimismo que esta variación y los niveles de altura final alcanzados dependen fuertemente de la posición radial.

Este comportamiento caracterizado por tres períodos principales (retardo, crecimiento continuo y estabilización) fue reportado por Lara y col. (2011). A su vez, los niveles de altura final alcanzados en el centro de la muestra coinciden con los resultados informados por Marcotte (2005): la altura final es alrededor de 4 veces la altura inicial.

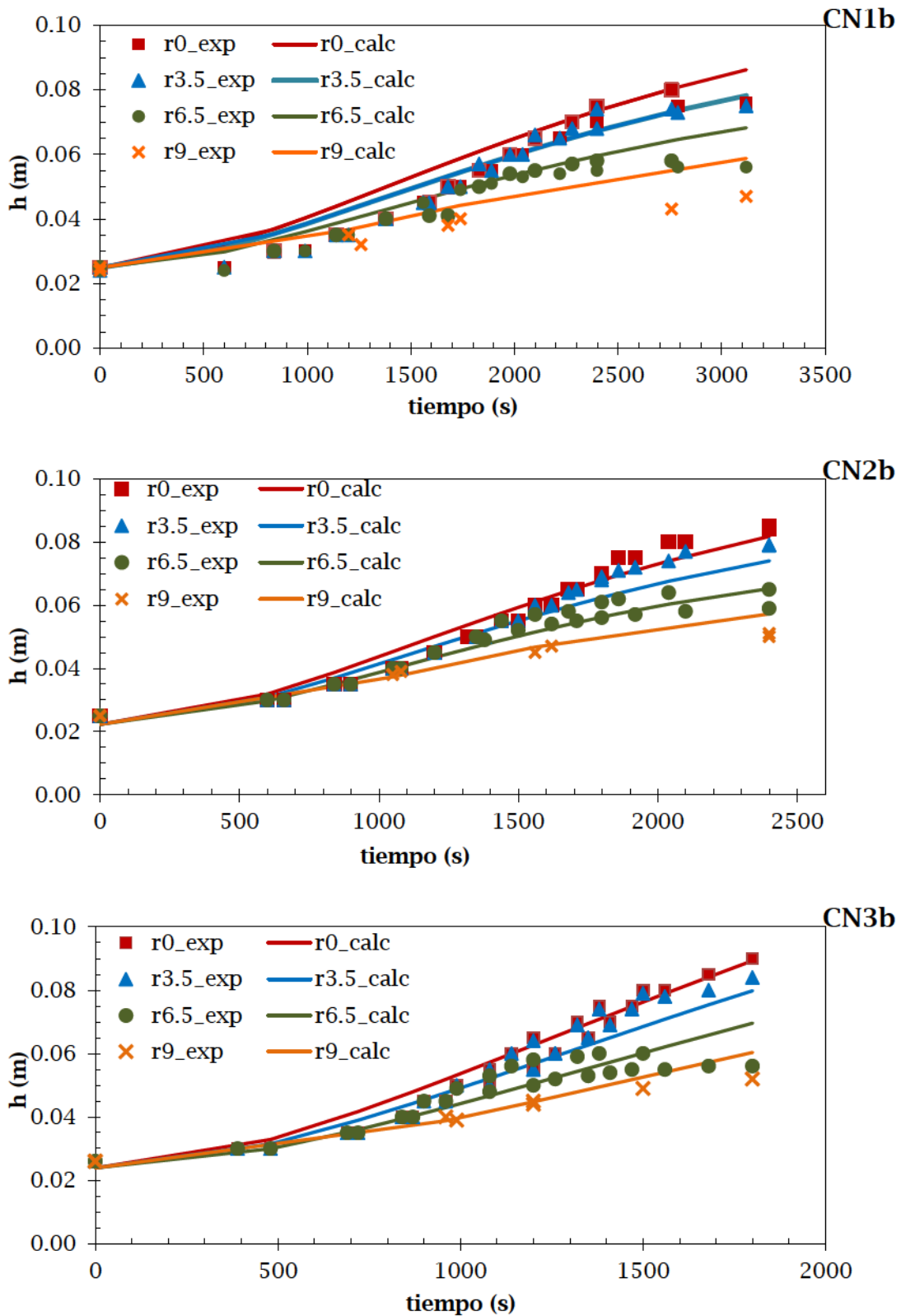


Figura 4.4. Datos experimentales (símbolos) y ajuste matemático (líneas) de evolución de altura de bizcochuelo bajo el modo convección natural.

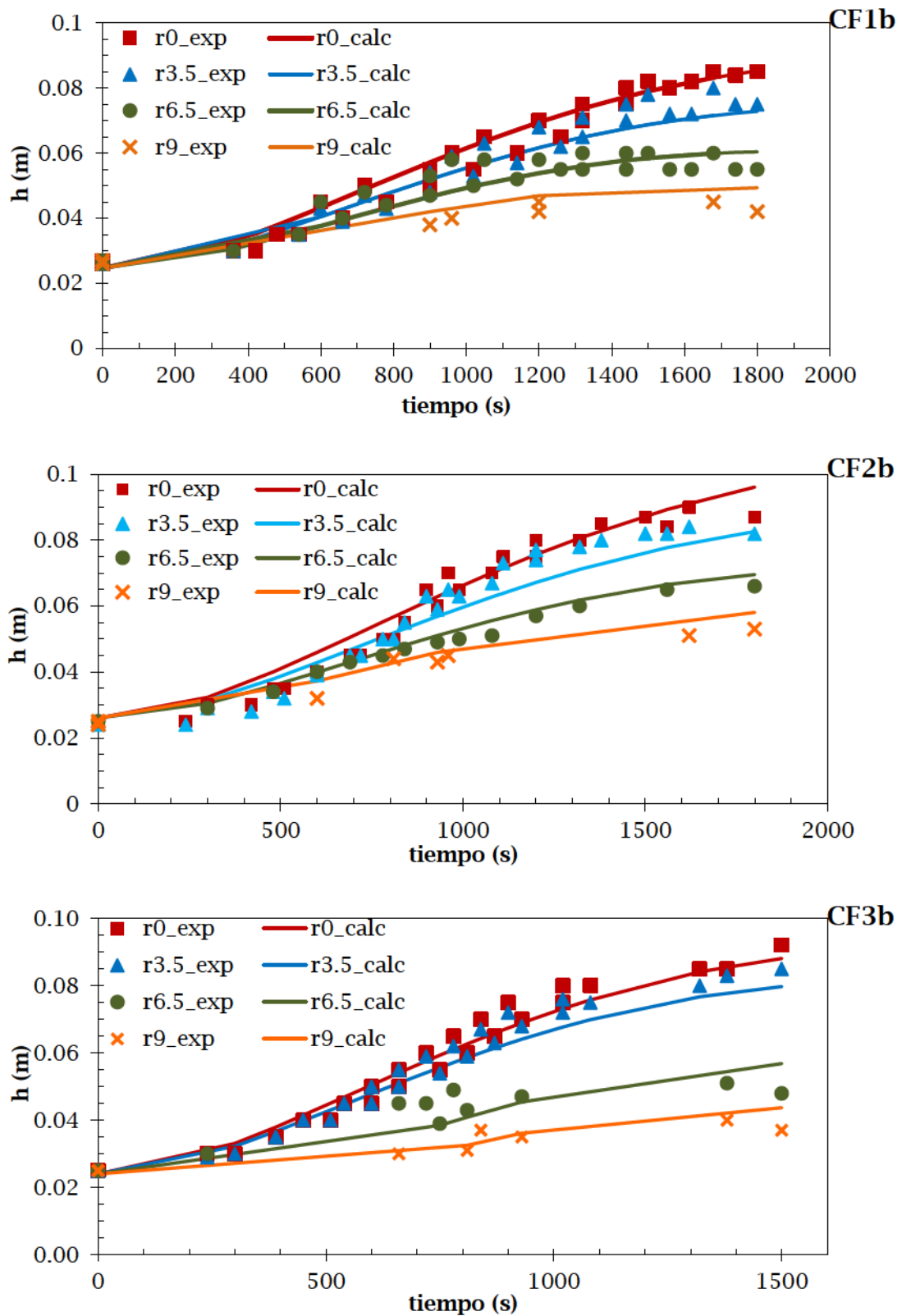


Figura 4.5. Datos experimentales (símbolos) y ajuste matemático (líneas) de evolución de altura de bizcochuelo bajo el modo convección forzada.

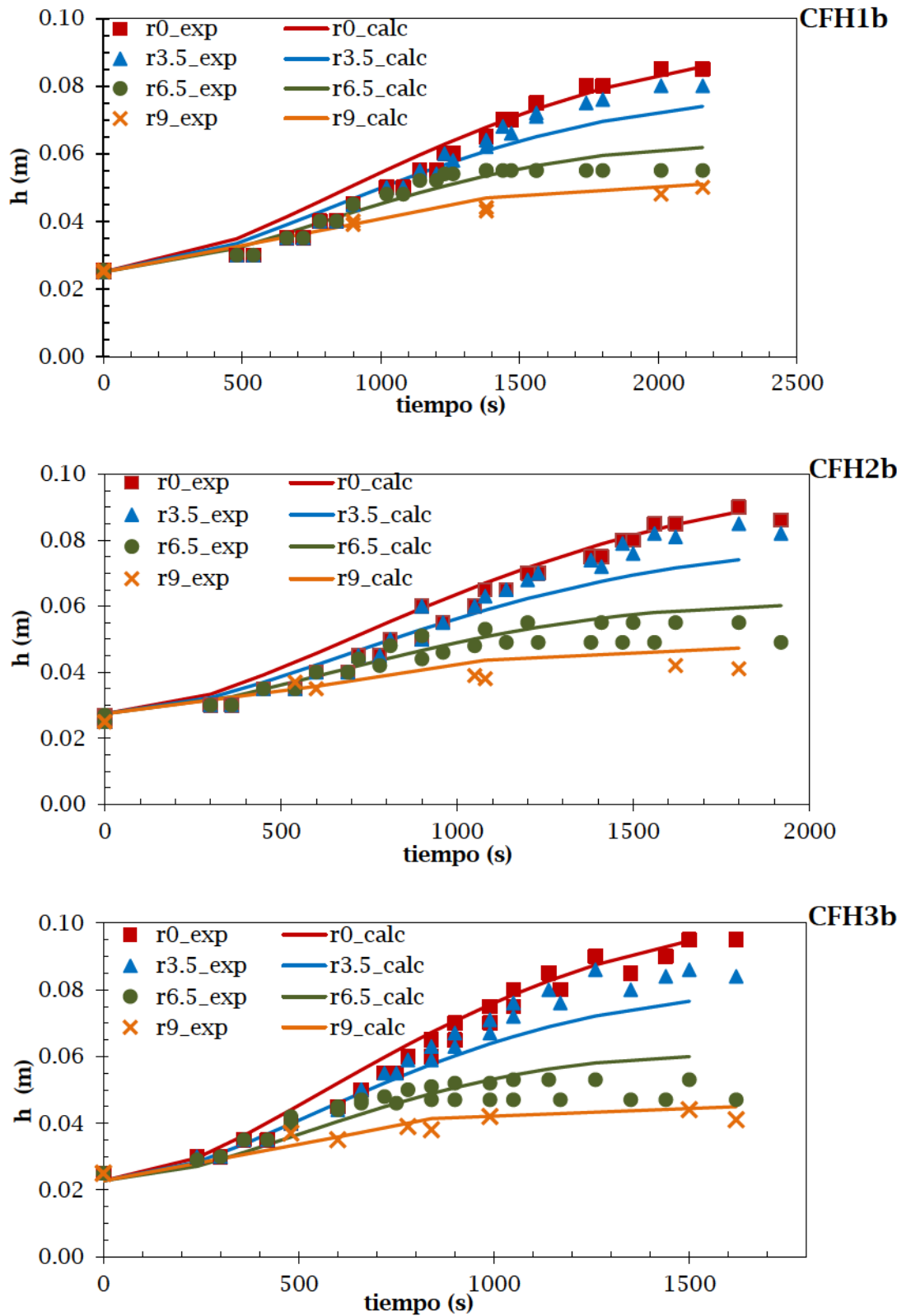


Figura 4.6. Datos experimentales (símbolos) y ajuste matemático (líneas) de evolución de altura de bizcochuelo bajo el modo convección forzada con humidificación.

Del análisis de los resultados experimentales de evolución de altura en función del tiempo, se propone una función de ajuste para representar la forma superficial característica de este producto (figura 4.7). Esta función empírica, de primer orden, contempla una demora, seguida por un período de crecimiento sigmoideo asintótico hasta la altura máxima registrada, y un término en función del radio (r). Para la regresión se utilizó el programa matemático Matlab 7.8. Así queda representada la evolución de altura h (m) en función del tiempo (t) y del radio (r) de acuerdo a la ecuación 4.1 ($R^2 > 0.95$):

$$h = h_0 + (m - q t - r^s) \left[1 - \left(1 + \frac{t}{n} \right) e^{-t/n} \right] \quad 0 \leq r \leq R \quad (4.1)$$

donde h_0 es la altura inicial de la muestra previa al horneado (m), t el tiempo de cocción (segundos), r el radio (m) y R el radio total (0.09 m). Luego m, q, s y n son constantes empíricas que dependen de la condición de procesamiento, detalladas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Constantes empíricas de las ecuaciones 4.1 y 4.2.

	CN1b	CN2b	CN3b
m	0.11	0.17	0.11
q(10 ⁵)	27.00	1.77	-87.1
s	1.30	1.22	1.18
n	1450	1524	1060
	CF1	CF2	CF3
m	0.17	0.18	0.18
q(10 ⁵)	3.35	2.75	4.31
s	1.12	1.10	1.25
n	1000	1000	805
	CFH1	CFH2	CFH3
m	0.16	0.14	0.16
q(10 ⁵)	2.43	2.04	3.01
s	1.15	1.06	1.05
n	1160	903	719

De modo de ilustrar la dependencia de la evolución de altura con el radio y el tiempo, en la figura 4.7 se grafica la ecuación 4.1 en función del radio para la condición CN1b, en distintos instantes de la cocción: al inicio, 4 instantes intermedios y al final del proceso.

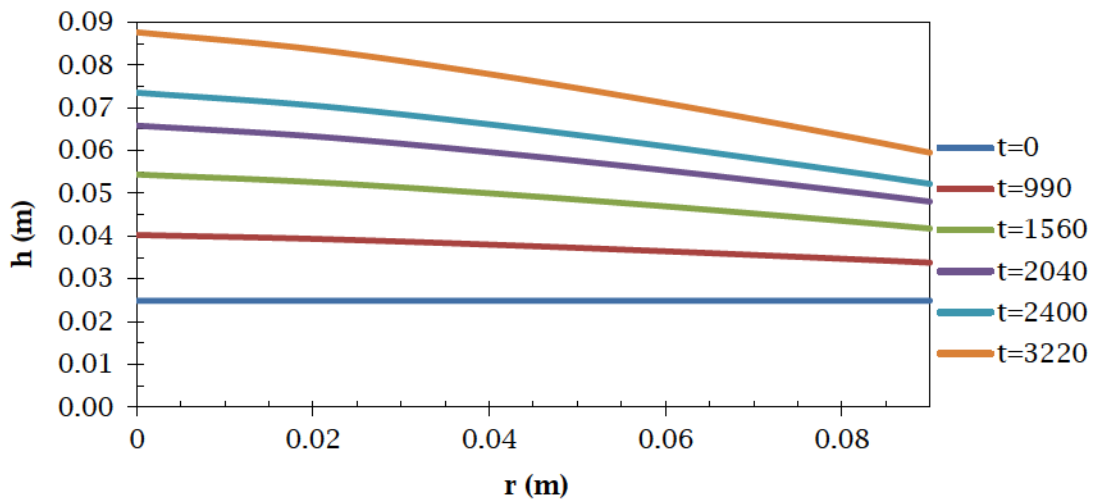


Figura 4.7. Evolución de altura de bizcochuelo horneado bajo la condición CN1b.

Finalmente, se calculó la derivada de la ecuación 4.1 de modo de obtener la velocidad de expansión, V_h (m s^{-1}), en función del tiempo (t) y del radio (r) la cual será de utilidad para el modelo matemático que será analizado en la sección 4.1.4.

$$V_h = (m - q t - r^s) \left(\frac{t}{n^2} e^{-t/n} \right) \quad (4.2)$$

4.1.3 Perfil de temperatura en el interior del producto

Como se mencionó en el capítulo de materiales y métodos, para monitorear la temperatura interna en este producto se colocaron tres termocuplas en cada muestra.

Durante experiencias preliminares se observó que la última región en alcanzar un desarrollo de la estructura final deseada era la situada en cercanías del centro ($r=0$), apenas por debajo de la corteza superficial, es decir la zona alta del bizcochuelo como se visualiza en la figura 4.8 donde se resalta la zona cruda de la muestra. A su vez, se nota en la figura 4.8 B, que en una instancia próxima al final del horneado la corteza superficial puede haber alcanzado un grado de desarrollo avanzado (deshidratación, espesor considerable y color marrón/dorado característico), pero la miga que se encuentra inmediatamente por debajo de ésta no ha adquirido aún su consistencia final.

Por este motivo, dos de las termocuplas se colocaron en el eje axial radial de la muestra a 5.5 y 7.5 cm de la base del molde, quedando por fuera del volumen inicial (mezcla) y una tercera en las cercanías del borde ($r=7$ cm) a 2 cm de la base del molde, T1, T2 y T3, respectivamente.

Si bien los ensayos se realizaron por duplicado por dificultades prácticas inherentes a la ubicación de las termocupas no se logra repetir con exactitud la posición de las mismas, en consecuencia, los resultados que muestran las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 corresponden a un único ensayo para condición operativa. En todos los casos, las tendencias se repitieron en los duplicados.

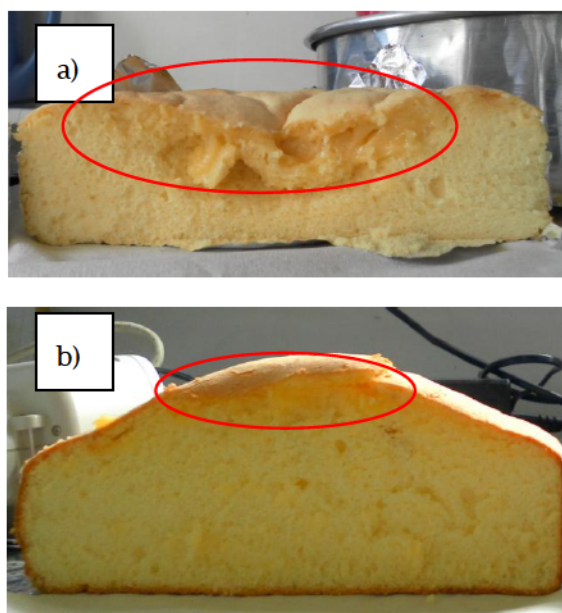


Figura 4.8. Bizcochuelo horneado a tiempos menores al de su punto de cocción. a) Etapa intermedia y b) etapa próxima al final del proceso.

En general, el comportamiento observado es similar para las nueve condiciones ensayadas. Apenas comenzado el proceso T1 y T2 presentan un registro por encima de los 100 °C, circunstancia totalmente esperable ya que están midiendo la temperatura del aire en las cercanías de la superficie del producto (línea quebrada en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11). Si bien presentan una evolución periódica similar a la registrada en los perfiles de temperatura de la cámara de cocción, no alcanzan los valores de esta última ya que se encuentran en una región protegida por las paredes del molde y cercana a la superficie de la muestra, la cual comienza a experimentar deshidratación. Reafirmando este hecho, la termocupla T2, que es cubierta por la muestra en expansión antes que la termocupla T1, registró valores de temperatura menor a esta última. Experimentalmente se observa que este descenso gradual de temperatura es consecuencia de la expansión volumétrica. Ambas termocuplas alcanzan valores entre 70-80 °C y a partir de ese instante el registro muestra el incremento de la temperatura en el interior de la muestra (línea continua), hasta estabilizarse en valores cercanos a los 95 °C (indicado con línea roja en las figuras). Este análisis de las temperaturas experimentales refuerza la idea de que la

última región en alcanzar un grado de cocción satisfactorio es la cercana a la corteza superior, alrededor del eje axial ($r=0$).

La termocupla T3, por su parte registra una evolución de temperatura siempre creciente aunque su velocidad de aumento disminuye a medida que se acerca a los 95 °C. Al final del proceso esta temperatura presenta un período de estabilización alrededor de 105 °C, sensiblemente mayor a las anteriores, lo cual es esperable ya que se encuentra en una región cercana al molde, que tiene una temperatura similar a la de la cámara de cocción.

Del análisis conjunto de los registros de temperatura y las evidencias experimentales ya discutidas (figura 4.7) se propone definir el tiempo mínimo de cocción (t_{\min}), como el tiempo promedio del intervalo de tiempo en el cual la termocupla T1 alcanza valores entre 95 y 98 °C, asegurando de ese modo una completa formación de la estructura porosa de la miga en todo el volumen de producto. En la tabla 4.3 se detalla esta variable, con su respectiva desviación estándar, para todas las condiciones ensayadas.

Tabla 4.3. Tiempo mínimo de cocción (s), experimental.

CN1b	CN2b	CN3b
3085 ± 18	2555 ± 70	1938 ± 95
CF1b	CF2b	CF3b
2420 ± 35	1925 ± 46	1780 ± 60
CFH1b	CFH2b	CFH3b
2400 ± 30	1910 ± 74	1680 ± 42

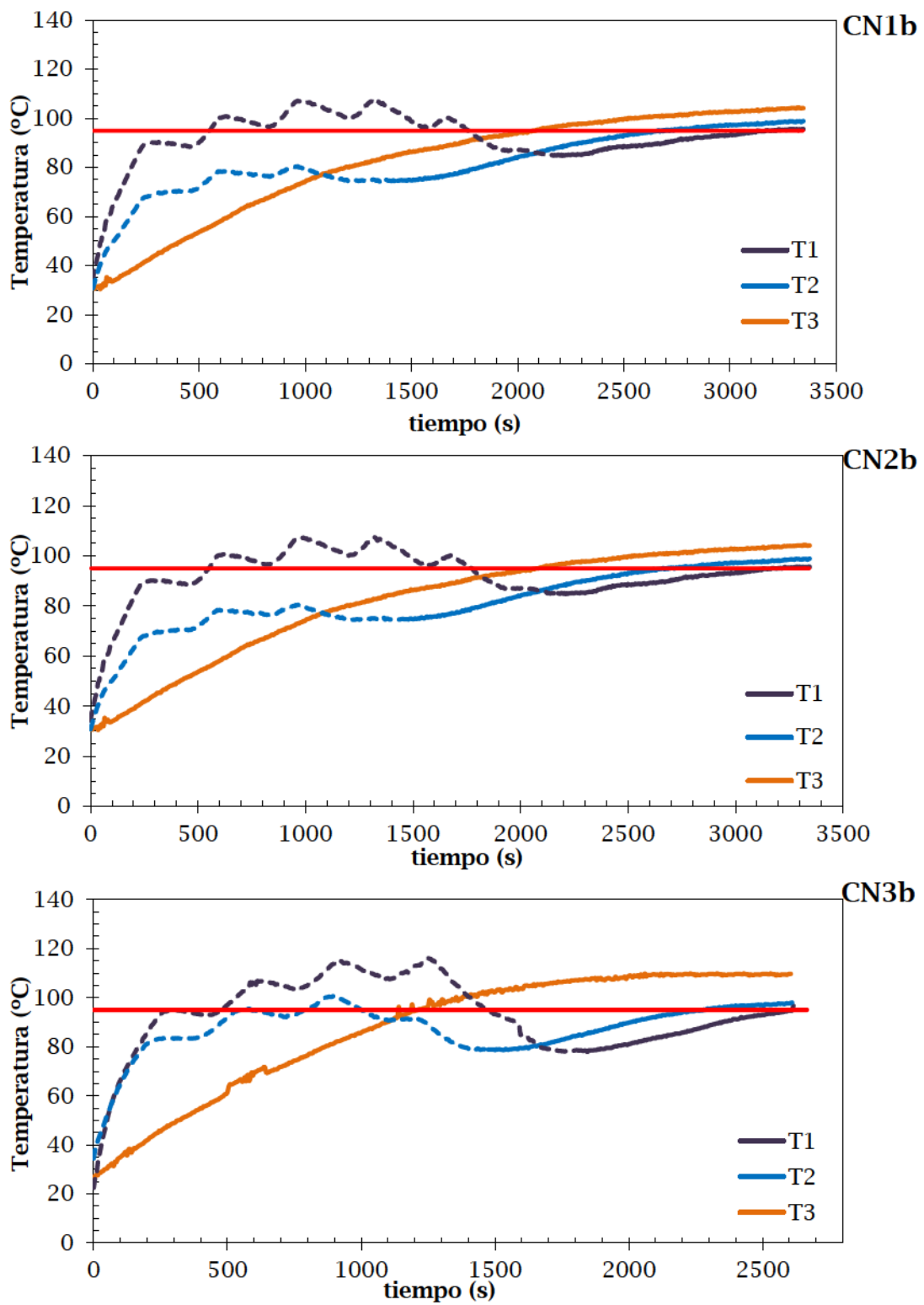


Figura 4.9. Perfil de temperatura en el interior de bizcochuelo horneado bajo el modo convección natural.

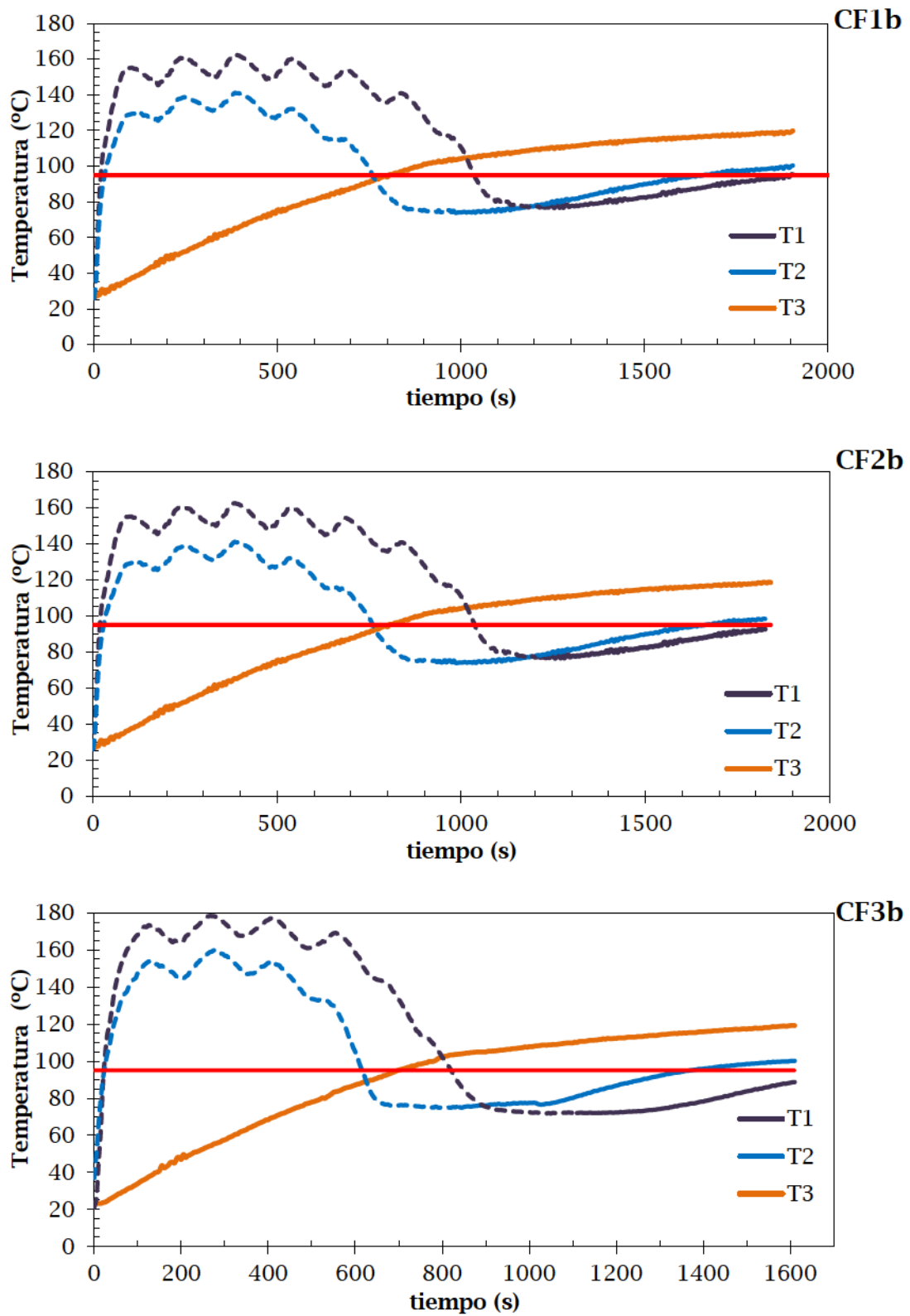


Figura 4.10. Perfil de temperatura en el interior de bizcochuelo horneado bajo el modo convección forzada.

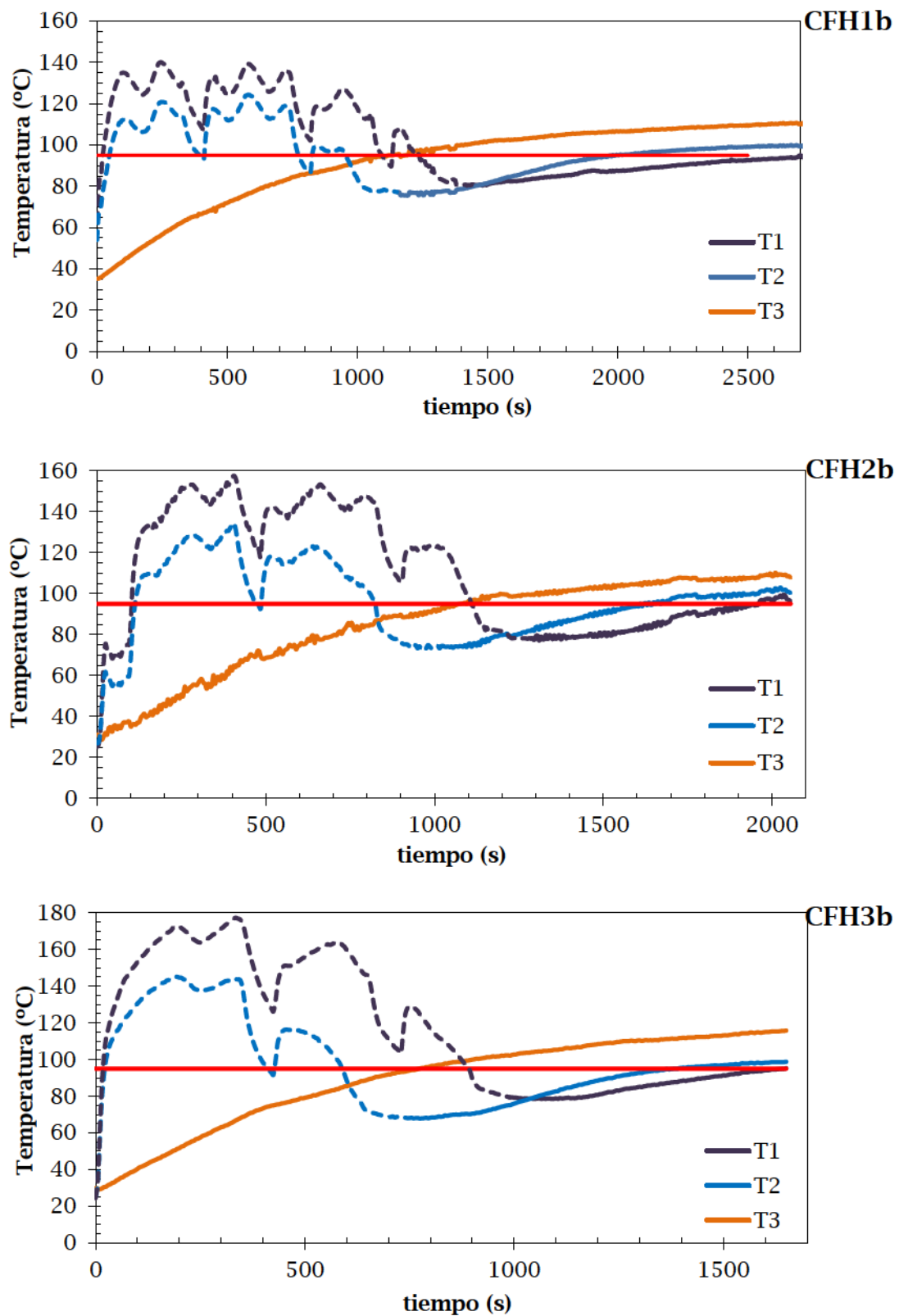


Figura 4.11. Perfil de temperatura en el interior de bizcochuelo horneado bajo el modo convección forzada con humidificación.

La figura 4.12 representa el tiempo mínimo de cocción, experimental, en función de la temperatura efectiva. Realizando un análisis análogo al presentado en el capítulo 3 (figura 3.14), encontramos una tendencia de tipo exponencial entre ambas variables, la cual se expresa en las ecuaciones 4.3 y 4.4. Nuevamente no se encuentran diferencias significativas entre los resultados de ambos modos de cocción con convección forzada (CFb y CFHb) con lo cual quedan agrupados en una misma curva de ajuste.

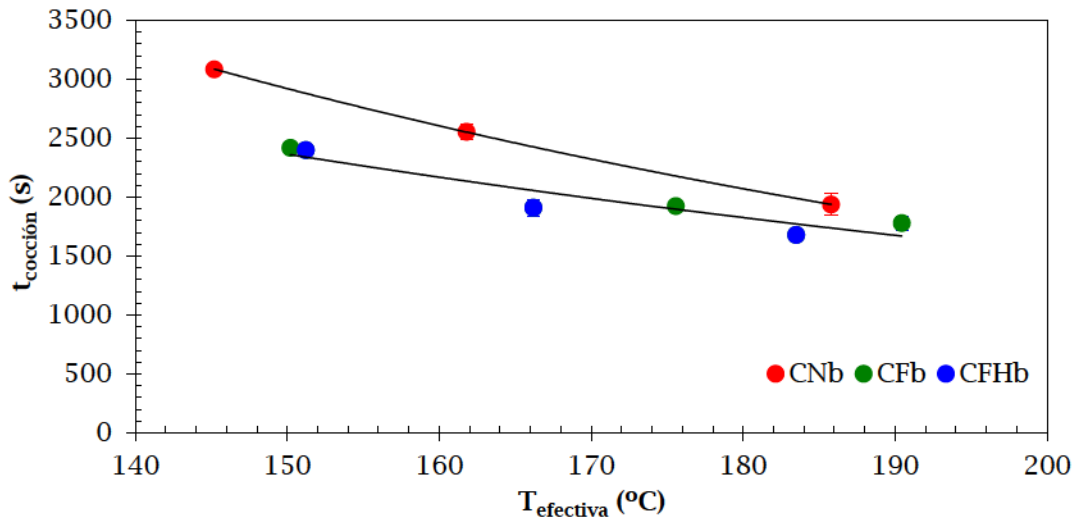


Figura 4.12. Tiempo mínimo de cocción en función de $T_{efectiva}$.

$$\text{CNb: } t_{cocción} (s) = 16289 \exp(-0.011T_{efectiva}), R^2 > 0.99 \quad (4.3)$$

$$\text{CFb y CFHb: } t_{cocción} (s) = 8617.8 \exp(-0.011T_{efectiva}), R^2 > 0.91 \quad (4.4)$$

4.1.4 Modelado de la transferencia de energía

La comprensión del proceso de horneado a partir de determinaciones experimentales cuantitativas tales como perfil de temperatura, expansión volumétrica, caracterización de la formación de la estructura porosa, desnaturalización de proteínas, gelatinización del almidón, formación de corteza y reacción de pardeamiento es limitada debido a la complejidad y simultaneidad de todos estos fenómenos (Zhang y Datta, 2006). El desarrollo de modelos matemáticos simplificados de la transferencia de energía y materia ya sea bajo el fin de estimar las propiedades termofísicas del producto y los tiempos del proceso o para optimizar el mismo en términos de rendimientos energéticos es un desafío actual (Sakin-Yilmazer y col., 2012) el cual complementado con determinaciones experimentales puede acercarnos al ajuste de las condiciones de proceso en vistas de la optimización del mismo.

De este modo, al igual que para madalena, se complementó el estudio fenomenológico del proceso de horneado de bizcochuelo con un modelo matemático de la transferencia de energía planteado de modo general para ambos productos en la sección 2.3.

En primer lugar, se construyó el dominio de simulación a partir de las dimensiones originales de la muestra de bizcochuelo (figura 2.10). La expansión volumétrica, considerada a través del desplazamiento del borde superior del dominio, incorpora una deformación continua de la malla de elementos finitos. La misma se programa utilizando las funciones ya presentadas en la sección anterior (ecuación 4.2 y parámetros de la tabla 4.2).

En la figura 4.13 se presenta la evolución con el tiempo de horneado del volumen del dominio de simulación: instante inicial hasta tiempo final de la simulación. En el esquema inicial (4.13.A) se puede observar el mallado triangular con altura inicial uniforme de 2.5 cm. Seguidamente se muestra la evolución de la geometría (4.13 B, C y D), correspondientes a los instantes de simulación de 1000, 2000 y 2800 segundos.

En líneas generales, los resultados de la expansión volumétrica simulada siguen las tendencias ya discutidas en la sección 3.1.4, respecto del horneado de madalena: se observa una buena representación del modelo en cuanto a la forma y el tamaño del volumen real, aunque el volumen simulado presenta una leve distorsión en su contorno.

En las simulaciones numéricas el valor T_{horno} correspondiente a las condiciones de contorno 2 y 3 (pared y base del molde, respectivamente) adoptó el valor promedio T_{efectiva} , presentada en la tabla 4.1 para las distintas condiciones operativas. En cambio, para la restante condición de contorno convectiva (4), dado que se contaba con valores experimentales de temperatura en las cercanías de la superficie del producto (T_1 y T_2) se adoptó un promedio de estos valores.

Los coeficientes de transferencia de energía (h_c) utilizados en estas simulaciones resultan muy similares a los informados para madalenas, ya que se trabaja en el mismo rango de temperaturas efectivas, aunque sí cambia la longitud característica del volumen de control, que es introducida en los números adimensionales Gr, Re y Nu. Así, los valores del coeficiente de transferencia calculados son 15, 25 y 20 ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) para los modos de cocción CNb, CFb y CFHb, respectivamente.

En bibliografía encontramos trabajos que calculan este parámetro para el proceso de cocción de este producto en particular. Entre ellos podemos mencionar Baik y col. (2000a) quienes compararon dos hornos continuos (tipo túnel), uno eléctrico y otro a gas, diseñados para el horneado de bizcochuelo, informando valores de coeficientes convectivos entre 5.7 y 7.4 $\text{W m}^{-2}\text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, sensiblemente menores a los calculados en este trabajo, sin embargo en este caso la velocidad de circulación de aire ($0\text{-}0.47 \text{ m s}^{-1}$) es considerablemente menor a la medida en nuestro caso para convección forzada (2.8 m s^{-1}). Fehailli y col. (2010) siguieron el progreso de las reacciones químicas responsables de la formación de la estructura del producto durante el

horneado de bizcochuelo, para lo cual utilizaron un horno eléctrico de tamaño similar a los utilizados en este trabajo, e informaron un coeficiente de transferencia de calor igual a $40 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

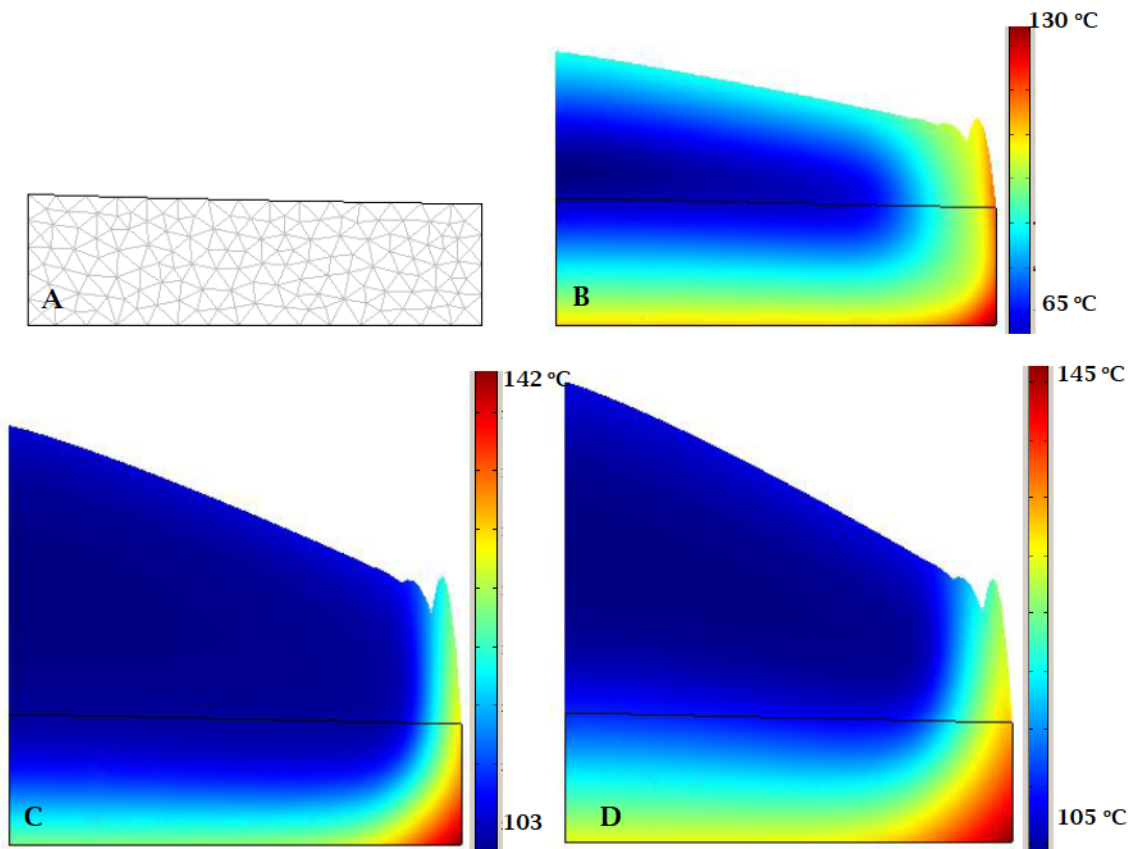


Figura 4.13. Geometría inicial (A) y su evolución durante la simulación de cocción para la condición CF1b (B, C y D se corresponden con 1000, 2000 y 2800 segundos de simulación).

Las propiedades termofísicas informadas en el capítulo 2 fueron adaptadas para este producto en particular, y así la densidad, la capacidad calorífica y la conductividad quedan representadas por las ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7, respectivamente.

$$\rho = \begin{cases} 1013 - 6.13 T & T < 100 \\ 400 & T \geq 100 \end{cases} \quad (4.5)$$

$$C_p = 2440 + 17876.8 \exp\left(-\exp\left(\frac{-T + 105}{4.5}\right) - \frac{T - 105}{4.5 + 1}\right) \quad (4.6)$$

$$k = \begin{cases} 0.27 + 0.18 \cdot 10^{-2} T & T < 100 \\ 0.2 & T \geq 100 \end{cases} \quad (4.7)$$

Con todas estas consideraciones, se resuelve el modelo previamente descripto para simular la transferencia de energía durante el horneado de bizcochuelo. Para validar los resultados de las simulaciones se compara la temperatura de los nodos de coordenadas (0, 0.075), (0, 0.055) y (0.075, 0.023) m, representativos de las posiciones de las termocuplas T1, T2 y T3, con los registros experimentales de las mismas. En las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se encuentran dichos perfiles experimentales y simulados para las condiciones operativas CNb, CFb y CFHb, respectivamente.

En general, el modelo representa satisfactoriamente los tres registros de temperatura medidos experimentalmente en el interior del producto, siendo la predicción de las historias térmicas aún mejor que la obtenida en el modelado del horneado de madalena. De modo de corroborar estas observaciones, se estudia la precisión del modelo de acuerdo al error ε (%), calculado utilizando la ecuación 2.12. Este parámetro resulta en un rango de [1.6 – 5.5] %, [1.5 – 5.7] % y [2.7 – 7.1] % para T1, T2 y T3, respectivamente, para todas las condiciones operativas estudiadas.

Teniendo en cuenta estos resultados de error, los cuales reafirman la buena representación del modelo, se calcula el tiempo mínimo de cocción (t_{\min}) a partir de los perfiles simulados de la temperatura T1, y se determina el error ε (%) de los mismos, ambos resultados se detallan en la tabla 4.4 para cada condición operativa ensayada.

Para todas las condiciones de procesamiento estudiadas, t_{\min} predicho por el modelo tiene un error menor a 4 %. En consecuencia, el modelo matemático desarrollado resulta una herramienta de gran utilidad a los fines prácticos ya que permite calcular tiempos de procesamiento de bizcochuelo y productos similares, evitando la determinación experimental.

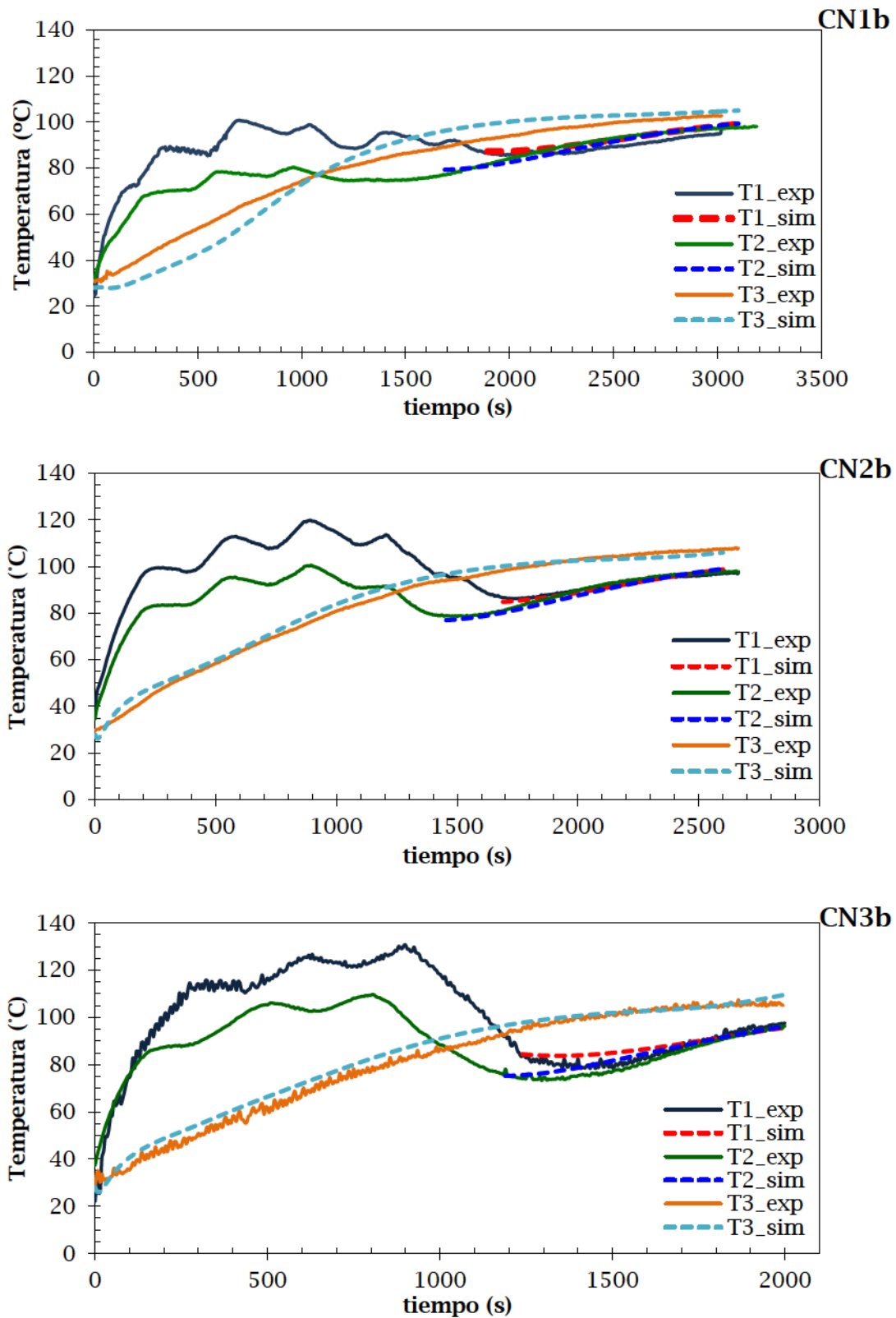


Figura 4.14. Perfiles de temperatura experimentales (línea llena) y predichos (línea partida) durante el horneado de bizcochuelo bajo convección natural.

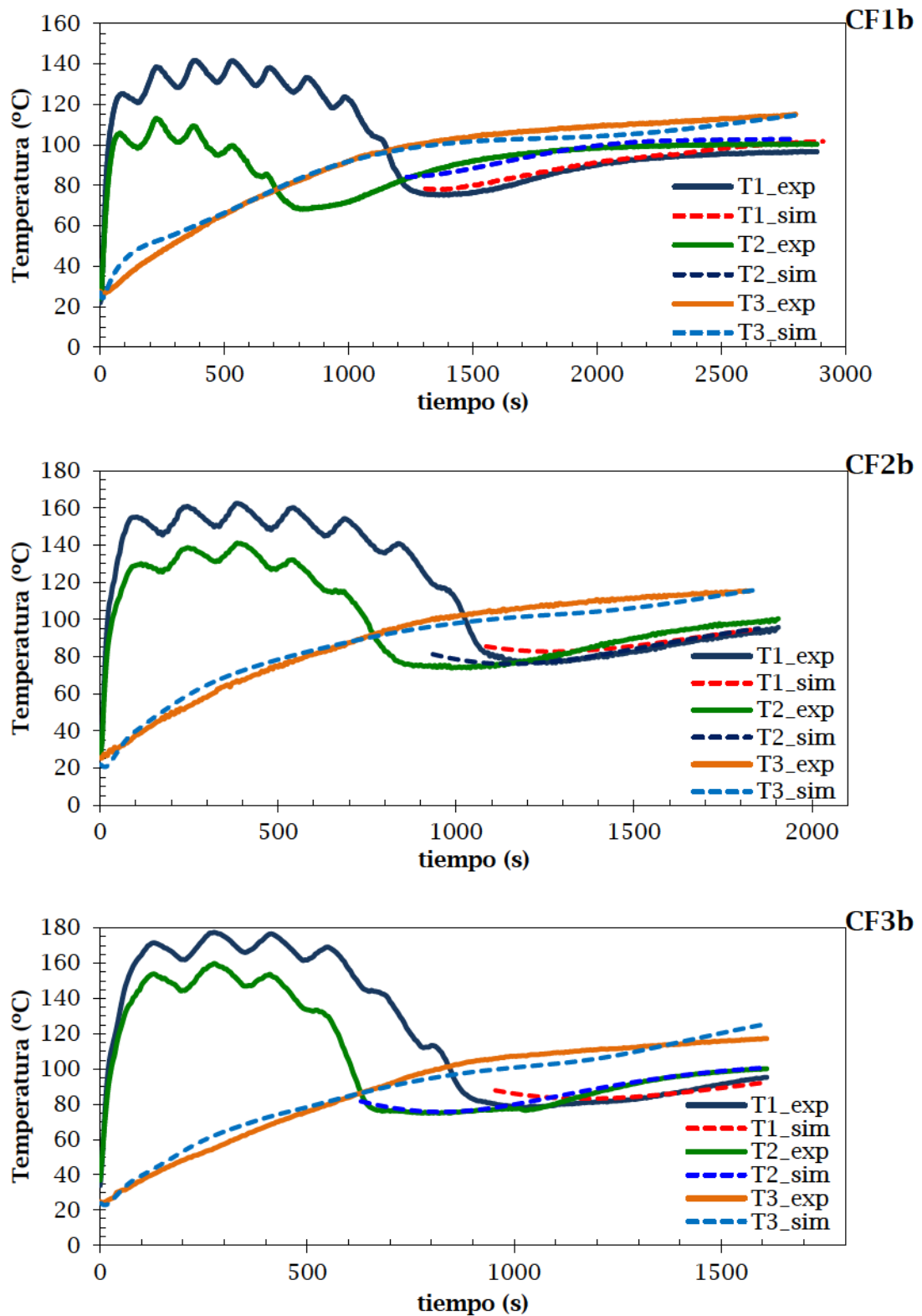


Figura 4.15. Perfiles de temperatura experimentales (línea llena) predichos (línea partida) durante el horneado de bizcochuelo bajo convección forzada.

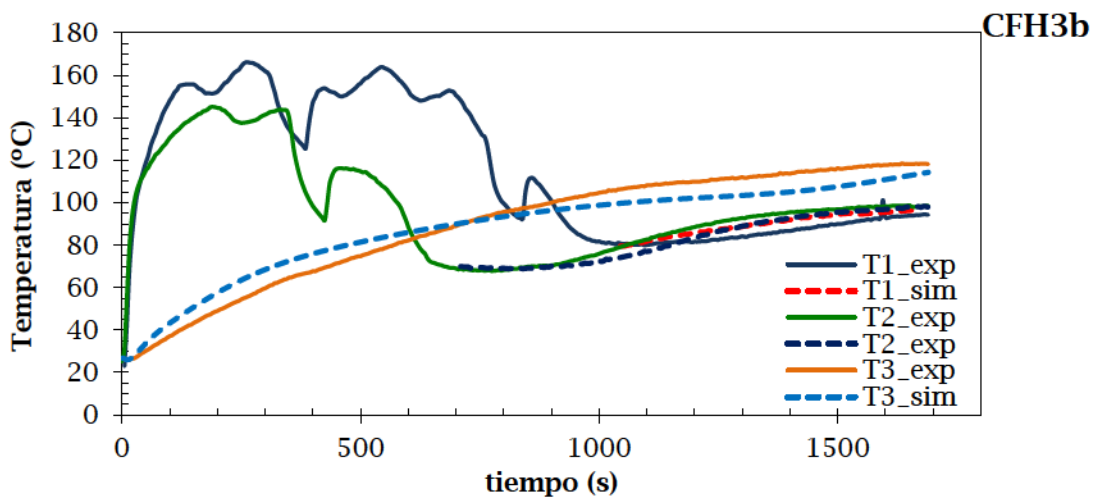
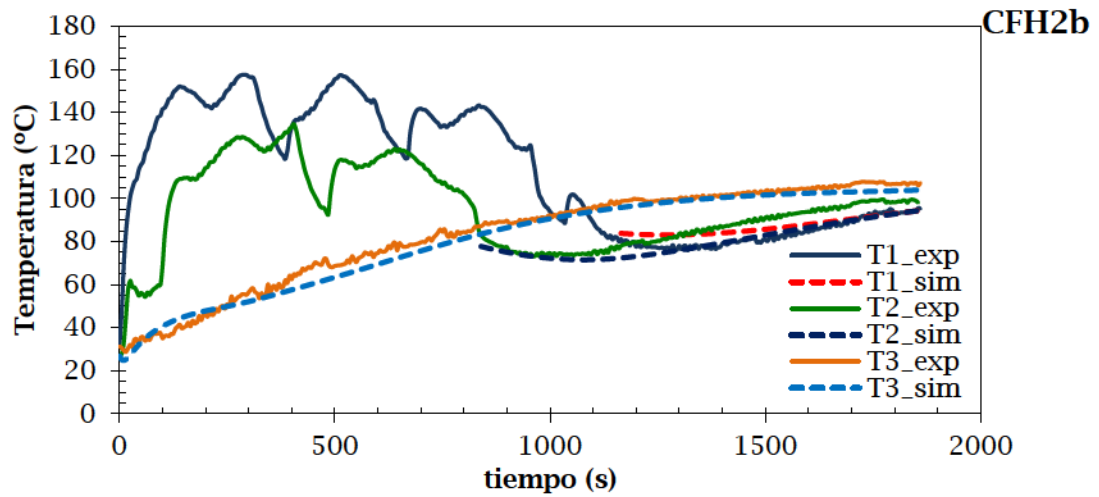
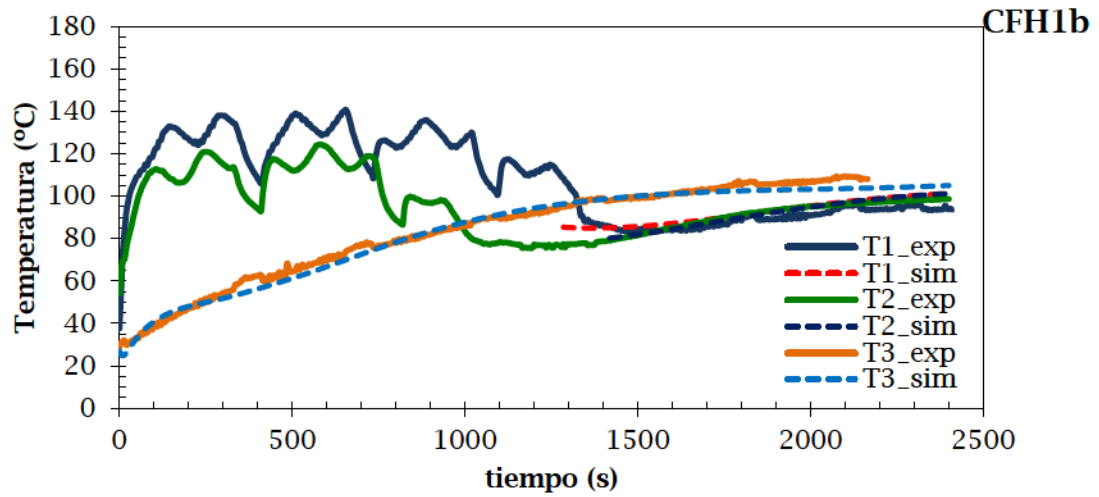


Figura 4.16. Perfiles de temperatura experimentales (línea llena) y predichos (línea partida) durante el horneado de bizcochuelo bajo convección forzada con humidificación.

Tabla 4.4. Tiempo mínimo (s) calculado y error (%) asociado.

	CN1b	CN2b	CN3b
t_{\min} (s)	3050	2478	2037
ε (%)	4	2	3
	CF1b	CF2b	CF3b
t_{\min} (s)	2440	2005	1710
ε (%)	3	2	1
	CFH1b	CFH2	CFH3b
t_{\min} (s)	2367	1970	1650
ε (%)	4	2	3

4.1.5 Consumo de energía

Sin lugar a dudas, estudiar y analizar la demanda y el aprovechamiento de energía durante el horneado de este producto, significa un aporte no solo al sector industrial, sino a sectores semi-industriales y de pequeños volúmenes de producción (Lezcano, 2011; Cernela y col., 2014). En esta sección se analiza esta variable en vistas de completar el estudio de la influencia de las distintas condiciones de operación ensayadas.

De este modo, se calcula el factor de uso f teniendo en cuenta la relación entre el período efectivo de calentamiento y el tiempo de cocción (t_{\min} en este caso) a partir de los perfiles de temperatura del interior de la cámara de cocción y de los tiempos presentados en la tabla 4.3. La figura 4.17 presenta estos valores en función de la temperatura efectiva. En concordancia con los resultados ya informados para madalena, f aumenta con la temperatura de operación, y esta relación es prácticamente lineal. Las tendencias encontradas analizando separadamente cada modo de cocción se expresan en las ecuaciones 4.8, 4.9 y 4.10, respetando el esquema de resultados utilizado en el capítulo anterior. Sin embargo no se puede concluir un efecto significativo del modo de cocción sobre este factor, sí de la temperatura efectiva de horneado.

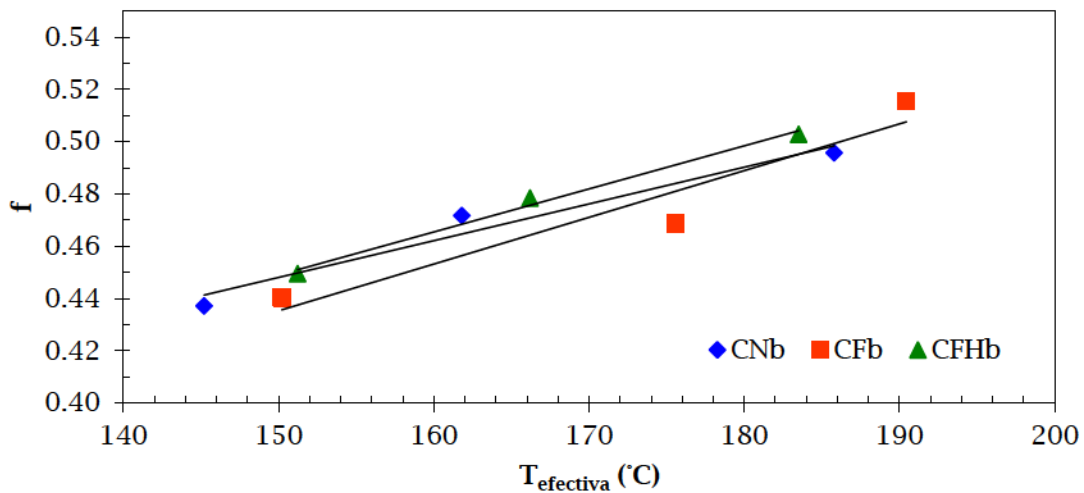


Figura 4.17. Dependencia del factor de uso con la temperatura efectiva de operación para el horneado de bizcochuelo.

$$\text{CNb: } f = 0.0014 T_{efectiva} + 0.237, R^2 > 0.96 \quad (4.8)$$

$$\text{CFb: } f = 0.0018 T_{efectiva} + 0.167, R^2 > 0.92 \quad (4.9)$$

$$\text{CFHb: } f = 0.0016 T_{efectiva} + 0.203, R^2 > 0.99 \quad (4.10)$$

Conocido el factor de uso de cada condición operativa, se procede a calcular el consumo energético para cada una de estas condiciones. Los resultados se presentan en la tabla 4.5 en términos de energía consumida por unidad de masa procesada (J kg^{-1}).

Tabla 4.5. Consumo energético determinado para cada condición de proceso.

	CN1b	CN2b	CN3b
$\text{CEt}_{\min} (\text{J kg}^{-1})$	5340.4	4772.2	3801.9
	CF1b	CF2b	CF3b
$\text{CEt}_{\min} (\text{J kg}^{-1})$	3740.8	3137.6	2969.4
	CFH1b	CFH2b	CFH3b
$\text{CEt}_{\min} (\text{J kg}^{-1})$	4368.8	3281.3	3041.3

Del análisis de los mismos surge que el hecho de trabajar con temperaturas mayores, en un mismo modo operativo, favorece la disminución del consumo de energía. Por otro lado al comparar entre modos de cocción observamos que la demanda energética es significativamente

mayor para el modo CNb, resultado directamente vinculado a los mayores tiempos de cocción requeridos (tabla 4.3).

Completando este análisis, en la figura 4.18 se presenta el consumo de energía en función del tiempo mínimo de cocción, para todas las condiciones ensayadas. En la misma se observa claramente que el consumo efectivo de energía depende linealmente del tiempo de horneado. Cabe remarcar que a tiempos de cocción similares, la demanda de energía de CFHb se mantuvo ligeramente mayor que para CFb, lo cual apunta a una clara influencia de la inyección de vapor sobre la demanda de energía.

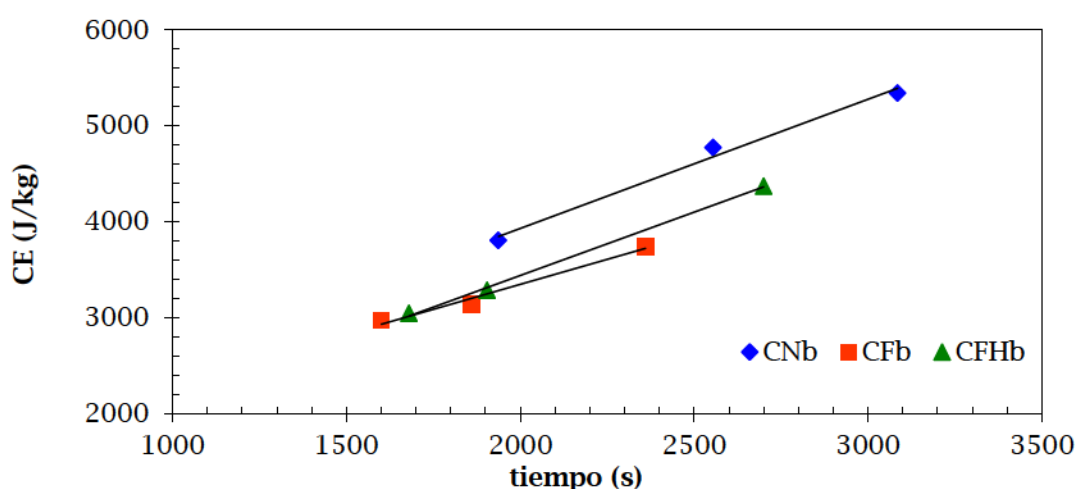


Figura 4.18. Consumo de energía en función del tiempo mínimo de cocción.

4.2 Determinación y análisis de parámetros de calidad de bizcochuelo

4.2.1 Evolución de color superficial

Para el seguimiento de las reacciones químicas durante el horneado es necesario obtener acceso simultáneo a ambos tipos de variables: físicas (temperatura, flujo de calor, humedad, velocidad del aire de circulación, tiempo de procesamiento) y químicas (reacciones y concentraciones de los productos de las mismas), afectadas por el tratamiento térmico, ya que todas ellas están interrelacionadas (Fehaili y col., 2010).

Considerando esto, al igual que para madalena, se realiza el seguimiento de la reacción de pardeamiento que experimenta la superficie del bizcochuelo durante el horneado a través de la determinación del índice BI de manera de caracterizar el color superficial.

La evolución del color superficial determinada a partir de los ensayos de horneado parcial (sección 2.4.1) es similar a la verificada en el monitoreo del pardeamiento de la corteza superficial durante el horneado de madalena.

El color inicial del producto (mezcla) corresponde a un índice BI=33, que se mantiene durante los primeros instantes de la cocción. Luego el índice BI aumenta de forma continua hasta llegar a un valor de estabilización dentro del rango de BI [100 - 110]. Valores finales similares de BI (tabla 3.8) se obtienen a partir de los parámetros de color informados por Baik y col. (2000), quienes estudiaron distintos aspectos del horneado de bizcochuelo.

Para ejemplificar este comportamiento, la figura 4.19 muestra la evolución de color superficial de bizcochuelo horneado bajo la condición CF1b. La evolución de color superficial, para todas las condiciones de cocción ensayadas, se presenta en la figura 4.20. Nuevamente la temperatura de cocción influye significativamente en el desarrollo de color.

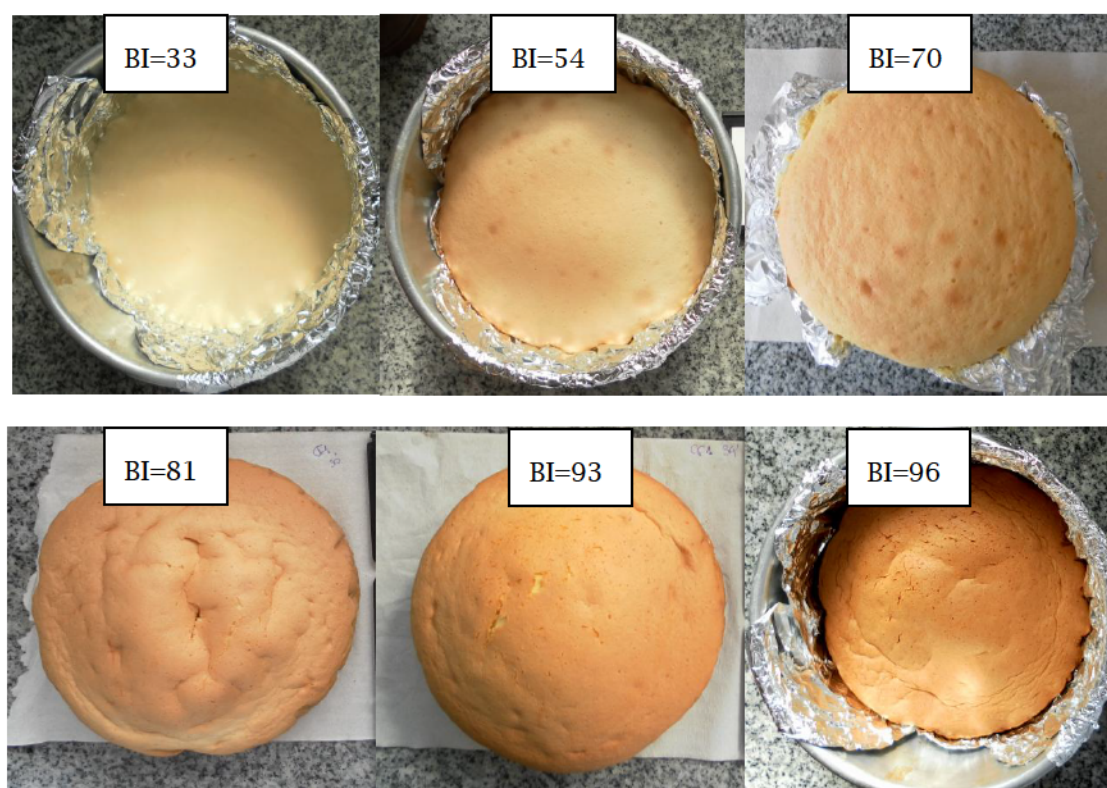


Figura 4.19. Secuencia de la evolución de color superficial de bizcochuelo.

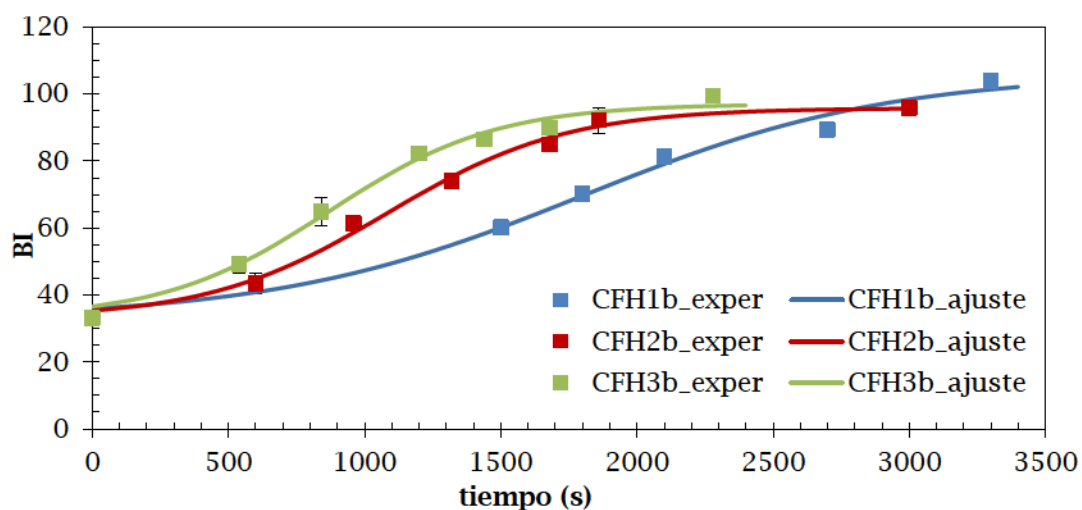
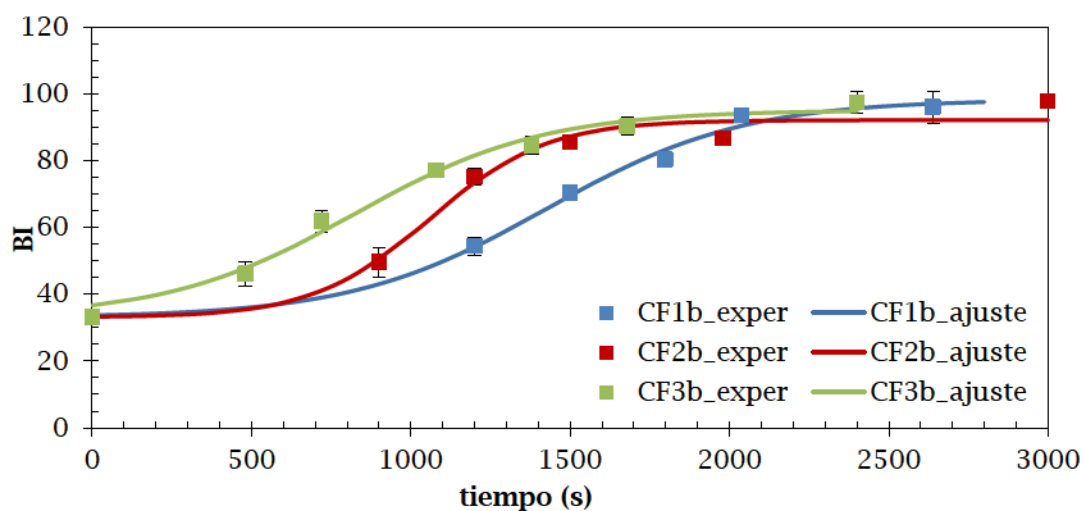
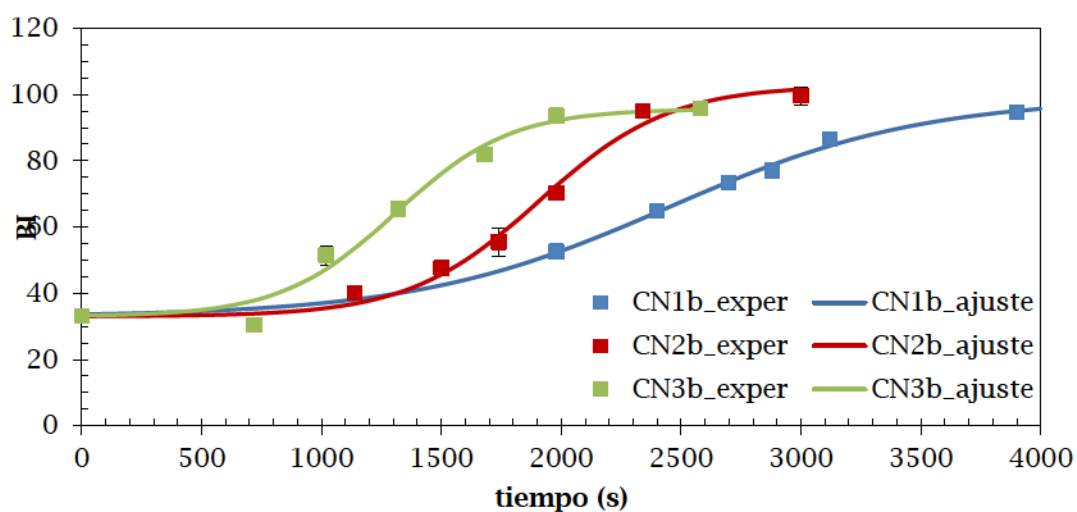


Figura 4.20. Evolución de color superficial de bizcochuelo, experimental (símbolo) y modelo cinético (línea).

Para representar el comportamiento del índice BI durante el tiempo de cocción se utiliza un modelo sigmoideo. En esta instancia se probaron varios tipos de ajuste: orden cero, primer orden, parabólico, weibull, logístico y de tipo dosis-respuesta. Este último resulta el más adecuado para describir el comportamiento experimental observado, quedando definido por la ecuación 4.11:

$$BI = BI_0 + \frac{(BI_{max} - BI_0)}{1 + 10^{(t_{1/2}-t)^p}} \quad (4.11)$$

donde BI es el índice de pardeamiento al tiempo t, BI_0 es el valor inicial ($t=0$), BI_{max} es el valor máximo alcanzado, p es una constante cinética (s^{-1}), y $t_{1/2}$ (s) es un tiempo medio, donde el valor de BI es igual al promedio entre BI_0 y BI_{max} . El modelo seleccionado brindó un buen ajuste ($R^2>0.94$) para todas las condiciones operativas. Los parámetros cinéticos según la condición operativa se informan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Parámetros de la cinética de pardeamiento, ecuación 4.11.

	CN1b	CN2b	CN3b
p (10^3 , s^{-1})	0.8	1.6	1.8
$t_{1/2}$ (s)	2450.3	1909.0	1310.6
	CF1b	CF2b	CF3b
p (10^3 , s^{-1})	1.4	2.4	1.5
$t_{1/2}$ (s)	1427.5	1059.4	823.8
	CFH1b	CFH2b	CFH3b
p (10^3 , s^{-1})	0.8	1.3	1.4
$t_{1/2}$ (s)	1799.0	1082.8	870.0

Analizando estos resultados, se verifica una dependencia de tipo exponencial del tiempo característico $t_{1/2}$ con respecto a la temperatura efectiva de operación, de modo análogo a lo descrito para los tiempos mínimos de cocción de este producto y para los tiempos característicos de la cinética de pardeamiento de madalena.

La tendencia de este parámetro para las condiciones CFb y CFHb puede representarse con una única curva de ajuste, mientras que la condición CNb presenta valores mayores de $t_{1/2}$ para similares temperaturas (figura 4.21). Las ecuaciones 4.12 y 4.13 expresan el ajuste exponencial hallado.

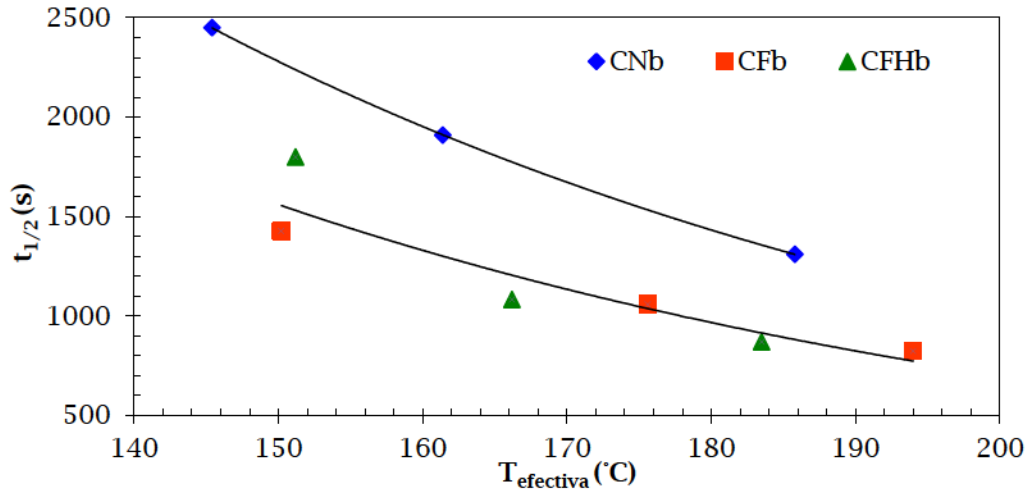


Figura 4.21. Dependencia de $t_{1/2}$ con la temperatura efectiva de operación.

$$t_{1/2} = 23361 \exp(-0.015 T_{efectiva}), (R^2 > 0.99) \quad (4.12)$$

$$t_{1/2} = 17030 \exp(-0.016 T_{efectiva}), (R^2 > 0.99) \quad (4.13)$$

En cuanto a la constante cinética p se observa que, en general, aumenta con la temperatura efectiva, no se encuentra una tendencia clara entre los distintos modos convectivos.

Anteriormente hemos mencionado que para este producto la cinética del índice BI no fue utilizada para determinar un punto de corte del proceso. Sin embargo, el modelo cinético presentado en la ecuación 4.11 permite determinar el nivel de BI correspondiente a los tiempos mínimos de cocción propuestos anteriormente (tabla 4.3). Los resultados se detallan en la tabla 4.7. Los valores calculados se encuentran en un rango de [84 - 96]. A modo ilustrativo se presentan imágenes (figura 4.22) de la superficie de las muestras horneadas en las condiciones CN1b, CFH1b, CF1b y CN2b, cuyos niveles de BI fueron 84, 87, 95 y 96, respectivamente. Cabe destacar que este producto, al tiempo mínimo de horneado, alcanza un desarrollo importante del color de su corteza, diferenciándose significativamente de lo observado en el horneado de madalena (figura 3.6). Este hecho se debe en parte a la diferencia de tamaño de ambos productos, en volumen cada madalena alcanza apenas un diez por ciento del volumen de bizcochuelo. En consecuencia el tiempo requerido para que su centro térmico llegue a la temperatura de mínima cocción es considerablemente menor y la superficie del producto está menos tiempo expuesta a temperaturas que favorecen el desarrollo de las reacciones de pardeamiento.

Tabla 4.7. Índice de pardeamiento BI calculado al tiempo mínimo de cocción.

CN1b	CN2b	CN3b
83.7	96.2	91.8
CF1b	CF2b	CF3b
95.0	91.5	92.7
CFH1b	CFH2b	CFH3b
87.3	91.3	92.8

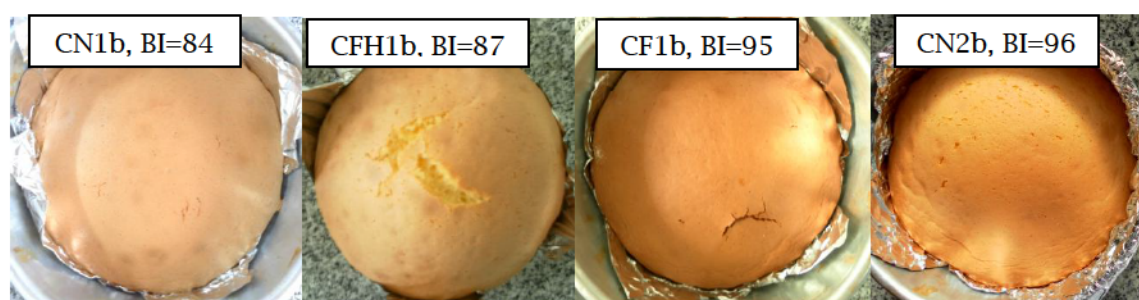


Figura 4.22. Color superficial de bizcochuelo al final de la cocción.

De los antecedentes bibliográficos se observa que otros autores informaron parámetros de color que se corresponden a valores del índice BI dentro del rango mencionado. En este sentido, Bilgen y col. (2004) estudiaron el efecto de distintas combinaciones de horneado utilizando cocción convencional y cocción con microondas sobre los parámetros de calidad de bizcochuelo, entre ellos, el color de la corteza medido con escala Cie $L^*a^*b^*$. De los valores informados hemos calculado el índice BI, el cual tomó valores entre [75 - 93]. Por otro lado, Vassiliki y col. (2013) analizaron el efecto de reemplazar la materia grasa un 35, 65 y 100 % en la preparación de bizcochuelo por una combinación de maltodextrina, inulina, oligofructosa, pectina cítrica y proteína de suero. Los autores, entre varios parámetros de calidad, midieron el color superficial de las muestras utilizando el sistema Cie Lab. Como resultado reportaron que el panel de consumidores consultado no halló diferencias significativas en el color superficial de las muestras, los valores informados se encuentran en un rango de índice BI [98 - 120].

4.2.2 Pérdida de peso

La evolución del contenido de humedad durante el horneado de bizcochuelo fue estudiada por varios autores fundamentalmente desde un enfoque que permitió simular matemáticamente este fenómeno a través de modelos difusivos de transferencia de materia, en

general asimilando el horneado a un proceso de secado. Se conoce que en los hornos convectivos este mecanismo sucede en simultáneo con la transferencia de calor, la cual genera un gradiente de temperatura en el interior del producto. El mismo favorece que el agua presente en el producto migre a través del mismo en dos direcciones opuestas: hacia el centro térmico (punto más frío) y hacia el exterior, es decir a la superficie del producto, donde finalmente sufre evaporación debido a las altas temperaturas de proceso. Como consecuencia, la cantidad de humedad que el producto pierde, está íntimamente relacionada con la cantidad de calor transferida a la muestra en el proceso (Lostie, 2002a, b; Sakin y col., 2007a, b; Wagner y col., 2007; Lara y col., 2011; Sakin-Yilmazer y col., 2012).

En este trabajo realizamos un seguimiento del contenido de humedad de bizcochuelo durante el proceso de horneado bajo las distintas condiciones estudiadas, según se detalla en la sección 2.4.2. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 4.23. Inicialmente el producto tiene un contenido de humedad 0.56 ($g_{\text{agua}} g_{\text{ss}}^{-1}$) y se observa que se deshidrata de manera continua a lo largo de todo el proceso de horneado. Este descenso depende considerablemente del modo convectivo (CNb, CFb y CFHb), no observándose una influencia importante de la temperatura de operación dentro de cada grupo.

El contenido de humedad calculado para los tiempos mínimos de cocción presenta valores entre [0.46 - 0.47], [0.43 - 0.45] y [0.45 - 0.46] ($g_{\text{agua}} g_{\text{ss}}^{-1}$) para CNb, CFb y CFHb, respectivamente. Distintos autores reportaron un comportamiento y valores similares a los presentados en este trabajo (Baik y col., 2000b; Fehaili y col., 2010; Sakin-Yilmazer y col., 2012)

A su vez, como mencionamos en el capítulo 2, la pérdida de peso global aporta información sobre el rendimiento en masa del proceso. Es así que se calculó la pérdida de peso (% b.h.) de bizcochuelos horneados con las distintas variantes operativas propuestas en este trabajo. Los resultados se encuentran en la tabla 4.8, los mismos fueron calculados para el tiempo mínimo de cocción. Los valores promedio de pérdida de peso para cada modo convectivo son 5.3 ± 0.4 , 7.2 ± 0.3 y 6.5 ± 0.8 para CNb, CFb y CFHb, respectivamente. Estos resultados siguen las tendencias esperadas, teniendo en cuenta el efecto de la ventilación y de la humidificación en los coeficientes de transferencia de materia. Este comportamiento de la pérdida de peso entre los distintos modos convectivos es similar al informado en el capítulo 3 para madalena. A su vez, como antecedente Baik y col. (2000a, b), quienes compararon el desempeño de dos hornos tipo túnel, uno a gas y otro eléctrico, adaptados para la cocción de bizcochuelo, informaron que a mayor velocidad de circulación de aire en la cámara de horneado registraron mayores pérdidas de peso.

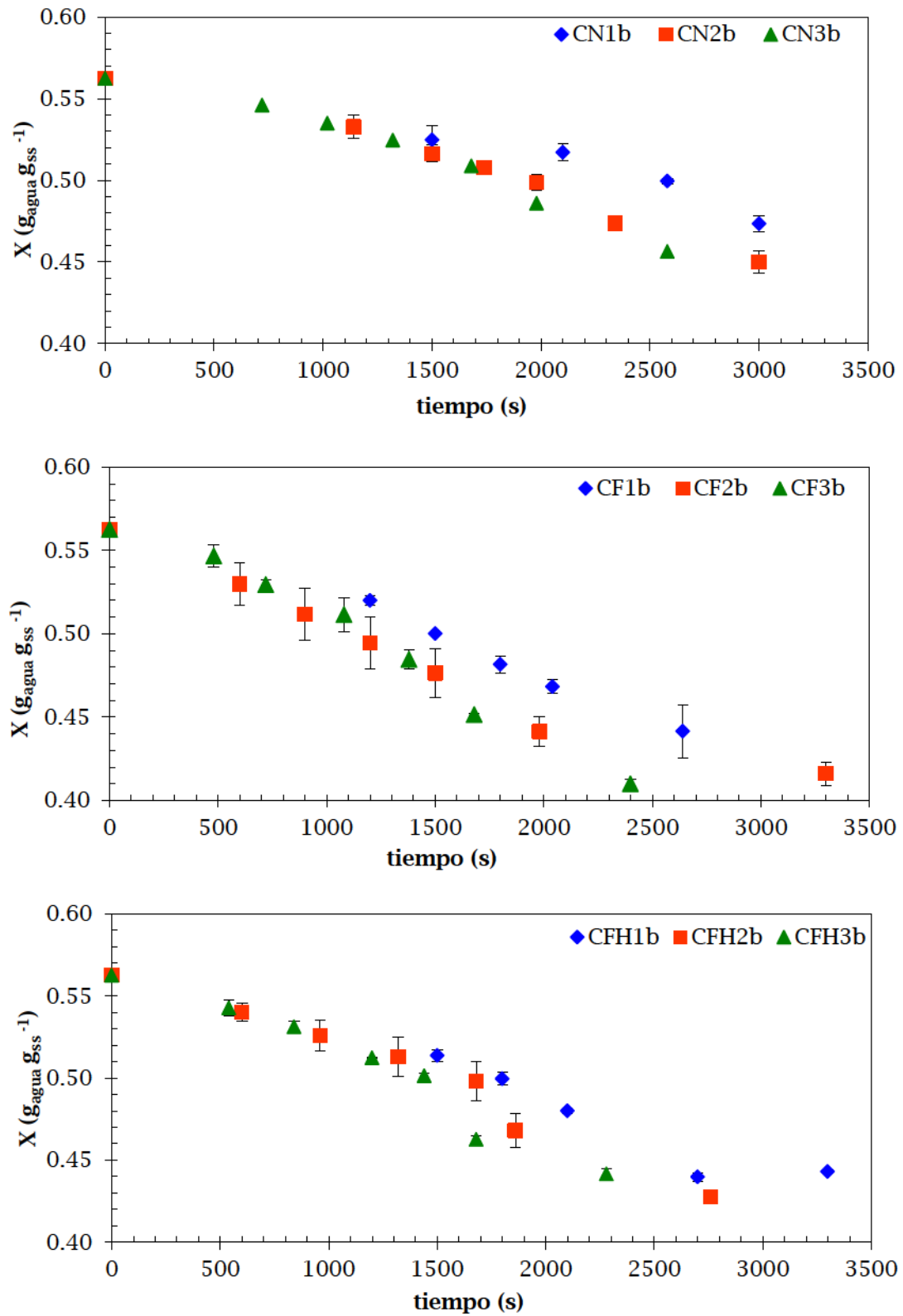


Figura 4.23. Evolución del contenido de humedad durante el horneado de bizcochuelo.

Tabla 4.8. Pérdida de peso (% b.h.) medidos al final del proceso de horneado de bizcochuelo.

CN1b	CN2b	CN3b
5.7 ± 0.3	5.2 ± 1.0	4.9 ± 0.5
CF1b	CF2b	CF3b
6.9 ± 1.0	7.2 ± 1.0	7.4 ± 0.5
CFH1b	CFH2b	CFH3b
6.6 ± 0.9	6.5 ± 0.6	6.4 ± 0.1

4.2.3 Análisis de la corteza y de la miga

La formación de la corteza es definida por algunos autores como el fenómeno más importante que gobierna la velocidad de cocción y el desarrollo de las características sensoriales deseables durante el horneado de pan y derivados. La formación de la misma conlleva la evaporación de agua del producto y a su vez, permite la retención de vapor y de dióxido de carbono (el cual es resultado de la acción de los agentes leudantes). De este modo la corteza superficial garantiza el desarrollo de una miga suave y aireada en el interior del producto (Wählby y Skjöldebrand, 2002; Lostie y col. 2002a, b, 2004). Sin embargo, como hemos mencionado previamente, en el caso de los productos estudiados en esta tesis no es deseable una corteza significativa. De esta manera resulta un desafío encontrar las condiciones de proceso que aseguren un desarrollo adecuado de esta característica del producto, cumpliendo a su vez con los otros requerimientos de la cocción.

4.2.2.1 Contenido de humedad

En primera instancia, teniendo en cuenta que el bajo contenido de humedad es una de las principales características que define la corteza, diferenciándola de la miga, se realiza un seguimiento de este parámetro en ambas regiones durante el horneado de bizcochuelo. En la figura 4.24 se muestran los resultados obtenidos para bizcochuelo horneado bajo la condición CN1b. Observamos que la miga mantiene el contenido de humedad de la mezcla inicial (36%), mientras que la corteza experimenta una deshidratación considerable, alcanzando un valor final de contenido de humedad de 10%. Este comportamiento de ambas regiones fue reportado también en trabajos enfocados particularmente al estudio del desarrollo de la corteza durante el horneado de pan (Zanoni y col., 1994; Wagner y col., 2007 y Vanin y col., 2009). Respecto de este tipo de productos encontramos como antecedente los trabajos de Lostie y col. (2002a, b) y Sakin-Yilmazer (2012) quienes informan una evolución del contenido de humedad de la miga y de la corteza durante el horneado de bizcochuelo similares a los presentados en este trabajo.

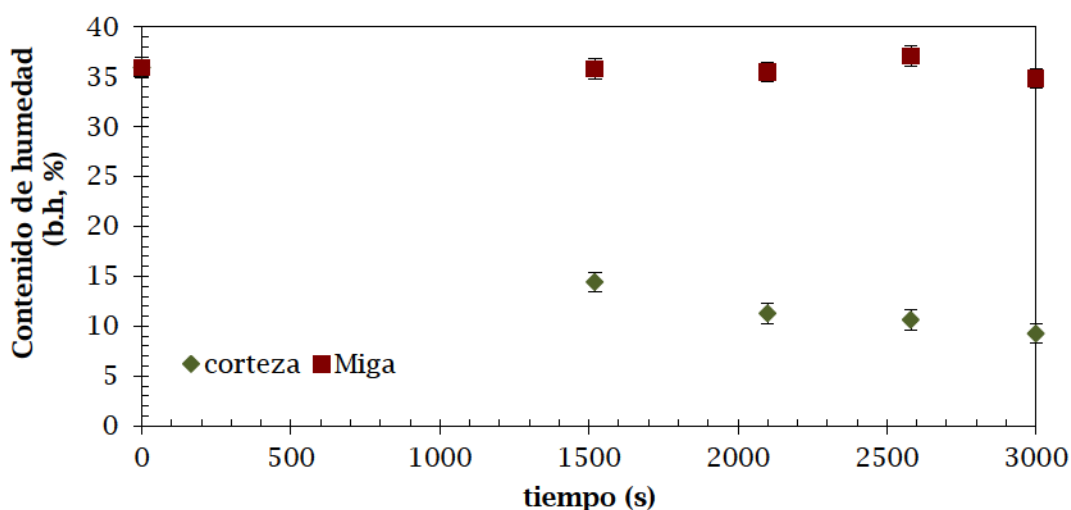


Figura 4.24. Evolución del contenido de humedad de la miga y de la corteza de bizcochuelo horneado bajo CN1b.

Puede observarse que durante el primer período de cocción (hasta 1500 s) no se registran datos experimentales. Esto se debe a que durante estos primeros segundos no se puede distinguir ni separar en la práctica experimental las dos regiones: miga y corteza. En este sentido, es importante remarcar que numerosos autores que estudiaron este fenómeno señalan que la formación de la corteza superficial no es instantánea, y que la transición a partir de la cual ambas regiones pueden ser perfectamente diferenciadas coincide con los instantes previos a la estabilización del perfil de temperatura interna, el cual a su vez coincide con el momento de máxima expansión volumétrica y máxima velocidad de deshidratación (Zanoni y Peri, 1993; Lostie, 1998; Thorvaldsson y Janestad, 1999; Wählby y Skjöldebrand, 2002; Lostie y col., 2002a, b; Lostie y col., 2004). En nuestra experiencia este fenómeno simultáneo se evidencia en el perfil de temperatura interna del producto (figura 4.9) y en la curva de pérdida de peso (figura 4.23) en tiempos cercanos a 1500 s.

En segunda instancia, se midió el contenido de humedad de corteza y miga al final del proceso de horneado para todas las condiciones estudiadas. La tabla 4.9 presenta los resultados mencionados.

Del análisis de los mismos surge que el contenido de humedad de la miga presenta prácticamente el mismo valor en todas las condiciones, alrededor de 34 – 35 %, mostrando una mínima disminución teniendo en cuenta el contenido de humedad de la mezcla inicial (36 ± 0.4 %). Por otro lado, corroboramos que la corteza presenta una deshidratación considerable, en todas las condiciones estudiadas. Los dos modos de operación sin humidificación (CNb y CFb)

manifiestan un efecto de la temperatura de horneado en el contenido de humedad de la corteza (de 9.3 a 5.8 %, de CN1b a CN3b; de 7.7 % a 5.7%, de CF1b/CF2b a CF3b).

Por el contrario, la condición de horneado con incorporación de vapor presenta un contenido de humedad de la corteza alrededor de 6.6 ± 0.5 %, independiente de la temperatura efectiva.

Tabla 4.9. Contenido de humedad (% b.h.) de la corteza y de la miga de bizcochuelo.

	CN1b	CN2b	CN3b
corteza	9.3 ± 1.1	7.6 ± 0.4	5.8 ± 0.7
miga	34.9 ± 0.3	34.3 ± 0.6	34.7 ± 0.3
	CF1b	CF2b	CF3b
corteza	7.6 ± 0.3	7.7 ± 0.5	5.7 ± 0.7
miga	35.3 ± 1.2	35.6 ± 0.1	35.4 ± 1.9
	CFH1b	CFH2b	CFH3b
Corteza	6.6 ± 0.7	6.9 ± 0.7	6.2 ± 0.4
miga	35.5 ± 0.5	35.2 ± 0.2	35.2 ± 0.2

4.2.2.2 Relación corteza/miga y espesor de corteza

Continuando con la caracterización de la corteza y la miga en el producto final, se presentan en la tabla 4.10 los valores de la relación corteza/miga. Encontramos que no hay diferencias significativas entre las distintas condiciones operativas, siendo el valor promedio 0.06 ± 0.01 (g de corteza/ g de miga). Como se detalló en el capítulo 2 estos valores fueron determinados a partir de la remoción de la corteza con bisturí, método que puede introducir un error considerable cuando la cantidad de corteza es significativamente menor a la de la miga, como sucede en bizcochuelo. Esto se ve reflejado en los valores de desviación presentados en la misma tabla.

Tabla 4.10. Relación corteza/miga (g/g) de bizcochuelo.

CN1b	CN2b	CN3b
0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.06 ± 0.01
CF1b	CF2b	CF3b
0.05 ± 0.01	0.08 ± 0.02	0.06 ± 0.01
CFH1b	CFH2b	CFH3b
0.07 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.01

De modo de poder complementar el análisis, se determina el espesor de corteza mediante ultrasonido, técnica que resulta más precisa. Ejemplos de las imágenes obtenidas se presentan en la figura 4.25. Los resultados de espesor de corteza con sus respectivos errores figuran en la tabla 4.11. Se observa que en general se repite la tendencia discutida en párrafos anteriores, no encontrando diferencias significativas entre los distintos modos operativos. El valor promedio de espesor de corteza es de 1.00 ± 0.04 mm, exceptuando la condición CN1b. Para esta condición en particular, se registra el mayor valor de espesor de corteza, atribuible al mayor tiempo de proceso que esta condición demanda.



Figura 4.25. Ecografía de bizcochuelo horneado bajo las condiciones CNb, CFb y CFHb (de izquierda a derecha, respectivamente).

Tabla 4.11. Espesor de corteza (mm) de bizcochuelo.

CN1b	CN2b	CN3b
1.17 ± 0.08	1.04 ± 0.12	0.90 ± 0.11
CF1b	CF2b	CF3b
0.98 ± 0.15	1.02 ± 0.11	1.02 ± 0.08
CFH1b	CFH2b	CFH3b
1.00 ± 0.09	1.00 ± 0.08	0.98 ± 0.10

4.2.4 Propiedades estructurales

4.2.4.1 Porosidad

Previamente mencionamos la complejidad de las reacciones responsables de la formación de la estructura interna de los productos de panadería en general. Como consecuencia para el estudio de la misma suelen realizarse varias técnicas de caracterización (Marcotte, 2005). En este sentido, se determina la porosidad de la miga del producto final según los distintos modos

convectivos y de temperatura ensayadas, aplicando la técnica de procesamiento de imágenes ya descrita.

En la figura 4.26 se muestran fotografías en color de la miga (original) y su respectiva imagen binaria. Todas ellas corresponden a bizcochuelo procesado a la menor temperatura de operación para los tres modos estudiados. Haciendo referencia a los resultados ya discutidos de porosidad de madalenas, la miga de bizcochuelo en todos los casos presenta una distribución de poros uniforme sin la presencia de canales o macroporos (producto de la aglomeración de varios poros pequeños) como presenta la miga de madalena obtenida bajo determinadas condiciones operativas.

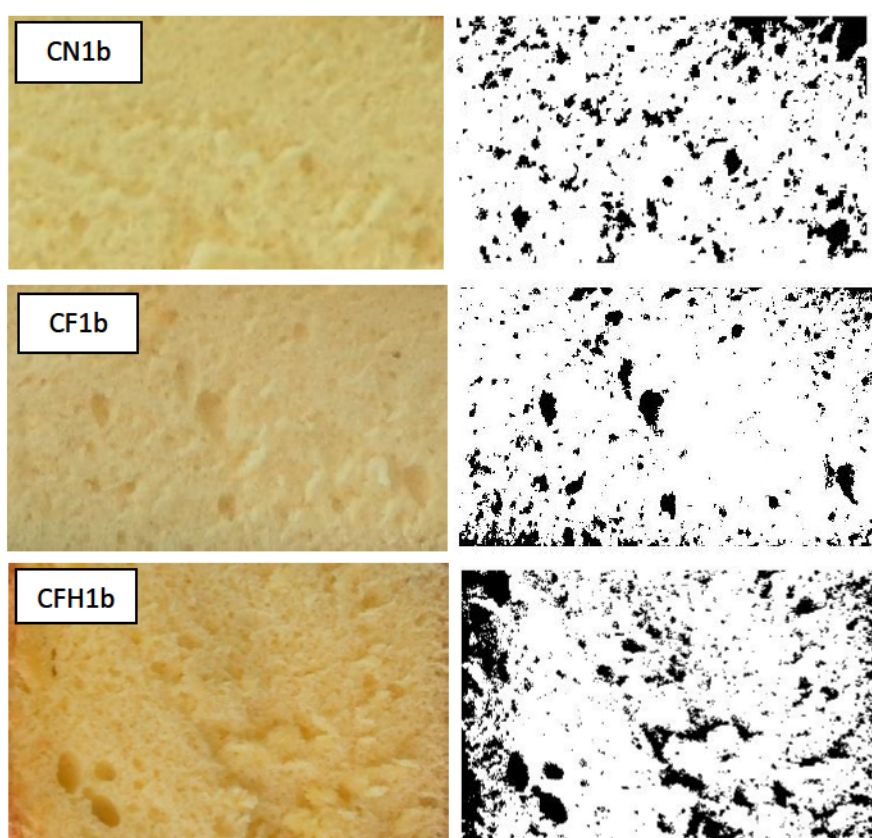


Figura 4.26. Miga de bizcochuelo (original y binaria, izquierda y derecha respectivamente) obtenidas bajo las condiciones CN1b, CF1b y CFH1b.

Los resultados de porosidad determinados con esta técnica se presentan en la tabla 4.12. De los valores presentados cabe destacar que en convección natural se verifica que las menores temperaturas de operación favorecen un buen desarrollo de la porosidad de la miga (7.9 ± 0.2 cel cm^2 en promedio). Por otro lado las madalenas obtenidas bajo condiciones de convección forzada, tanto CFb como CFHb, presentaron valores de porosidad similares (6.6 ± 0.6 cel cm^2 , en promedio).

Tabla 4.12. Porosidad (cel cm²) de la miga de bizcochuelo.

CN1b	CN2b	CN3b
8.1 ± 0.3	7.8 ± 0.2	5.1 ± 1.3
CF1b	CF2b	CF3b
6.0 ± 0.9	7.0 ± 1.0	6.9 ± 0.7
CFH1b	CFH2b	CFH3b
6.9 ± 0.8	7.0 ± 0.7	6.0 ± 0.9

4.2.4.2 Densidad global y de miga

Otra determinación que aporta a la caracterización de la estructura de bizcochuelo es la densidad global del producto y de la miga en particular. Los resultados se informan en la tabla 4.13.

En todos los casos la densidad global es mayor que la densidad de miga. Estos valores incluyen la corteza del producto, la cual como consecuencia de la deshidratación, no logra desarrollar una matriz porosa expandida, sino más bien compacta y densa (Lostie y col., 2002a, b; Jefferson y col., 2007; Mohd y col., 2009; Altamirano-Fortoul y col. 2012).

Tabla 4.13. Densidad global y de miga (kg m³) de bizcochuelo.

	CN1b	CN2b	CN3b
ρ	487.7 ± 57.0	489.6 ± 31.8	442.2 ± 65.0
ρ _m	392.3 ± 44.9	416.1 ± 19.5	401.6 ± 48.7
	CF1b	CF2b	CF3b
ρ	424.3 ± 50.2	426.0 ± 41.1	416.7 ± 55.0
ρ _m	404.4 ± 21.0	405.4 ± 21.3	376.3 ± 65.4
	CFH1b	CFH2b	CFH3b
ρ	466.5 ± 30.2	470.1 ± 48.1	486.1 ± 47.0
ρ _m	430.7 ± 21.8	401.4 ± 35.6	406.7 ± 37.8

En cuanto a la densidad de la miga no se encuentran diferencias significativas considerando todas las condiciones estudiadas. En promedio, la miga de bizcochuelo presenta una densidad de 404 ± 15 kg m³. Estos resultados se encuentran en el rango de valores de densidad de bizcochuelo informados por distintos autores. En este sentido, Gómez y col. (2007) al comparar

el comportamiento de bizcochuelo preparado con distintos hidrocoloides reportaron valores de densidad global en el rango [380 – 450] kg m³ incluyendo la muestra control. Kocer y col. (2007) estudiaron el efecto de utilizar polidextrosa como sustituyente del azúcar y de los lípidos en bizcochuelo determinando varios atributos de calidad, entre ellos densidad informando valores en un rango de [290 – 380] kg m³.

4.2.4.3 Textura

Por último, se analiza la miga de bizcochuelo mediante ensayos de textura, específicamente análisis de perfil de textura (TPA) y ensayos de relajación como se describió en el capítulo 2. Los resultados determinados a partir de estos ensayos se detallan en la tabla 4.14.

Tabla 4.14. Firmeza (*F*), cohesividad (*C*), y elasticidad (λ) de la miga de bizcochuelo.

	CN1b	CN2b	CN3b
<i>F</i> (N)	4.0 ± 0.3	2.3 ± 0.4	3.2 ± 0.6
<i>C</i>	0.6± 0.1	0.6± 0.0	0.6± 0.2
λ (s)	13.8 ± 1.4	14.4 ± 1.5	16.1 ± 1.9
	CF1b	CF2b	CF3b
<i>f</i> (N)	3.1 ± 0.2	3.0 ± 0.4	2.5 ± 0.3
<i>C</i>	0.6± 0.1	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.0
λ (s)	15.0 ± 1.9	17.8 ± 2.0	16.3 ± 0.9
	CFH1b	CFH2b	CFH3b
<i>F</i> (N)	2.5 ± 0.3	2.4 ± 0.2	2.9 ± 0.4
<i>C</i>	0.6± 0.3	0.6± 0.1	0.6± 0.2
λ (s)	12.5 ± 1.6	14.0 ± 1.6	13.5 ± 1.9

En primer lugar, se analizan los resultados de firmeza que se encuentran en un rango de [2.3 - 4.0] (N). El valor promedio es de 2.9 ± 0.5, similar a la firmeza media determinada para madalena. A su vez, valores similares de firmeza fueron reportados por Meziani y col. (2012) quienes analizaron la influencia de las condiciones de congelación y del contenido de agentes leudantes sobre la calidad final (física y sensorial) del producto horneado (Kougelhoph, una torta típica de Alemania, Alsacia, Austria y Suiza).

Respecto de los modos de cocción se observa en las condiciones CNb y CFb una leve disminución de la firmeza al aumentar la temperatura de horneado. Por otro lado la

humidificación durante el proceso genera una estructura menos firme, independiente de la temperatura de operación.

En cuanto a la cohesividad no se encuentran diferencias significativas entre todas las condiciones operativas. La gomosidad, parámetro que deriva de la multiplicación de la firmeza por la cohesividad, como es esperable sigue el mismo comportamiento de la firmeza. Si bien a partir del ensayo de perfil de textura se pueden obtener otros parámetros de textura: elasticidad, adhesividad, consistencia, entre otros, no se informan dado que no contribuyen a la caracterización textural de la miga.

El tiempo de relajación que caracteriza la elasticidad de la miga, evaluado a través del ensayo específico de relajación no presenta gran variación entre las distintas condiciones operativas, siendo el valor promedio calculado 14.8 ± 1.6 , respectivamente.

Estos resultados hacen referencia a un producto de miga uniforme, independiente del modo de cocción empleado para obtenerlo, de valores favorables de cohesividad y tiempos de relajación breves. A su vez, remarcamos que según los resultados informados en la sección 4.2.4.1, la miga presentó en todos los casos una distribución uniforme de poros. Jia y col. (2014) evaluaron el efecto de congelar y almacenar la mezcla inicial de torta formulada con hidrocoloides, encontrando que la presencia de poros pequeños con una distribución uniforme favorece el desarrollo de características deseables de textura, volumen y forma.

4.3 Aceptabilidad sensorial de bizcochuelo

La posibilidad de realizar un análisis conjunto de distintos atributos de calidad a través de técnicas instrumentales y sensoriales es una herramienta muy valiosa que ayuda a mejorar el conocimiento de los procesos (Drake y col., 2007).

Teniendo en cuenta esto, se realiza un estudio sensorial de bizcochuelo horneado bajo las distintas condiciones de proceso evaluadas en esta tesis. De acuerdo a la metodología detallada en el capítulo 2, el análisis sensorial de este producto se enfoca a caracterizar por separado corteza y miga, evaluando apariencia y cantidad de corteza, por un lado, y consistencia y esponjosidad de miga, por otro.

Las figuras 4.27 y 4.28 presentan los histogramas de la aceptabilidad en cuanto a cantidad de corteza y a la apariencia de la misma, respectivamente. En este sentido la tendencia de los resultados es muy similar para ambas características. Puede observarse que las muestras horneadas con modo convección natural fueron calificadas positivamente en general, sin distinción de la temperatura de operación, mostrando un alto número de respuestas con puntuaciones entre 7 y 8. En cambio, para las muestras horneadas bajo convección forzada ambos atributos de corteza recibieron una puntuación alta (entre 7 y 9) solo para las condiciones de menor temperatura de operación (CF1b y CF2b). Finalmente, para el producto

obtenido con inyección de vapor la cantidad de corteza fue calificada positivamente para todas las temperaturas ensayadas, aunque al 39 % de los consumidores les resulta indiferente este atributo de calidad (puntuaciones entre 4 y 6).

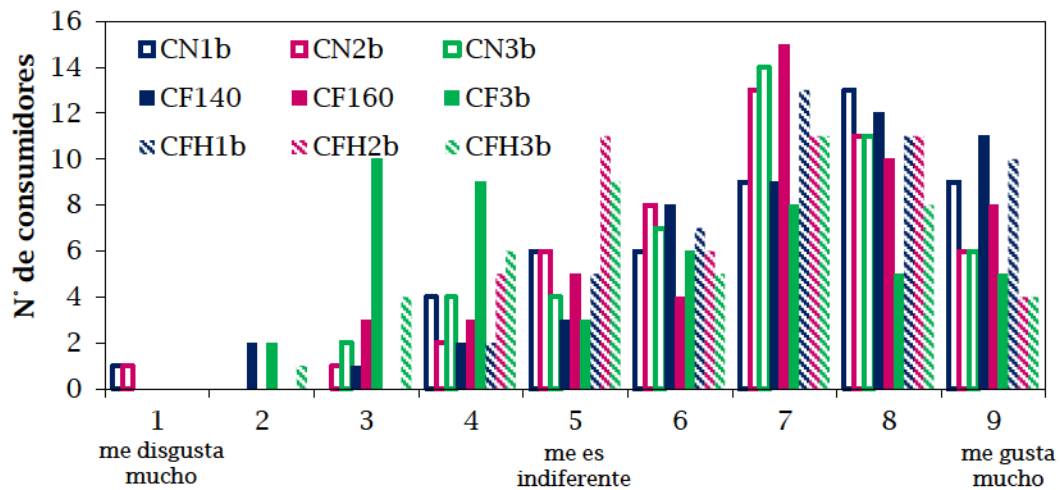


Figura 4.27. Histograma de aceptabilidad de la cantidad de corteza.

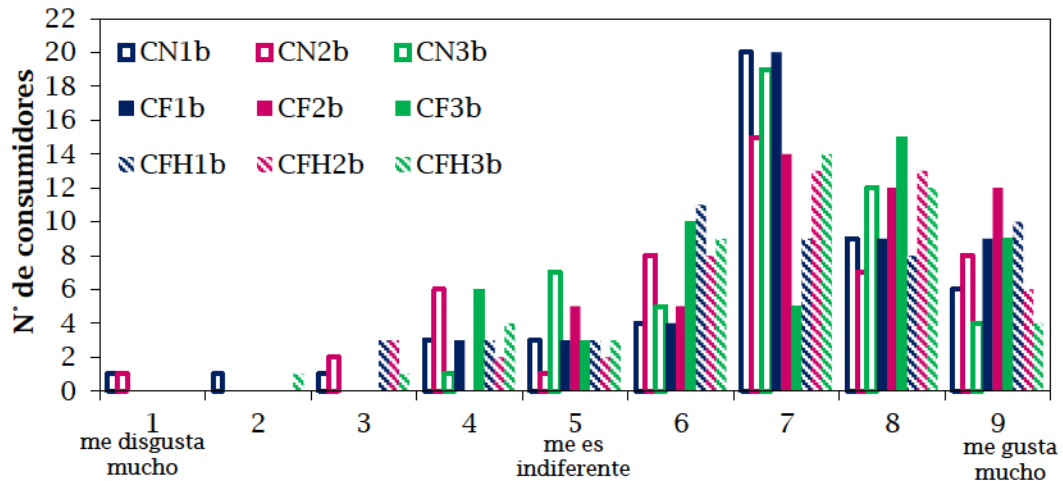


Figura 4.28. Histograma de aceptabilidad de la apariencia de la corteza.

En cuanto a los atributos sensoriales de la miga, la figura 4.29 presenta los resultados de la aceptabilidad respecto a su consistencia. En este sentido encontramos que los consumidores calificaron en general positivamente las muestras obtenidas bajo CNb, CFHb y CFb procesadas a las menores temperaturas de operación (CF1b y CF2b). La mayor frecuencia de respuestas estas condiciones se encuentran entre 7 y 9. En cambio, el 42% de los consumidores consultados

calificó negativamente (entre 3 y 4) la consistencia de la miga de las muestras procesadas a la mayor temperatura de convección forzada (CF3b).

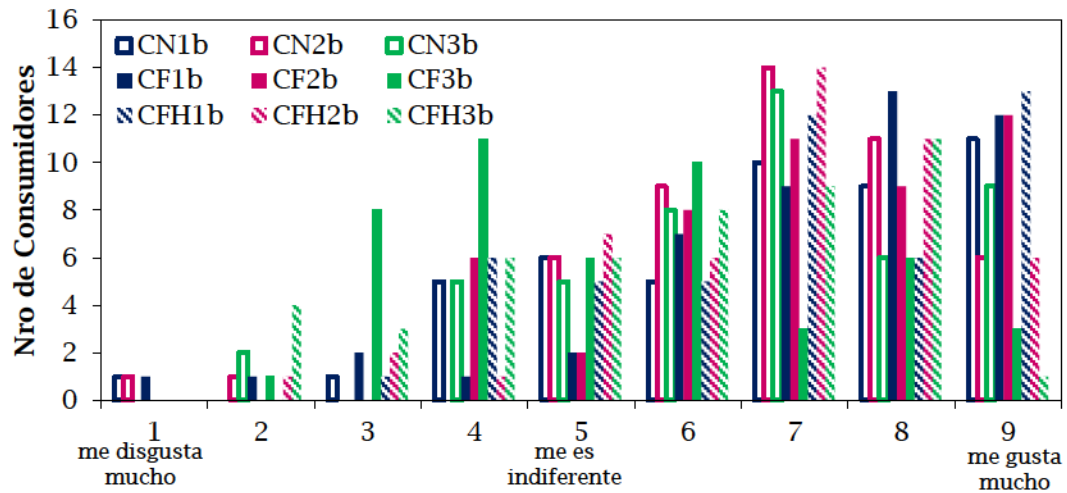


Figura 4.29. Histograma de aceptabilidad de la consistencia de la miga.

Completando el análisis sensorial de la miga, en la figura 4.30 se presentan los resultados de la evaluación sensorial respecto a la esponjosidad de la miga. Para este atributo, los consumidores calificaron positivamente todas las muestras evaluadas. Cabe destacar que para determinadas condiciones se observó una mayor preferencia. En este sentido, un 67% de los consumidores califica la esponjosidad de la miga de las muestras obtenidas bajo CN3b con un puntaje entre 7 y 8; un 60 % de ellos calificó a las muestras procesadas bajo CF2b entre 8 y 9; y finalmente, 65 % de los integrantes del panel, calificó la esponjosidad de las muestras horneadas bajo la condición CFH3b con una puntuación entre 7 y 8.

Nuevamente la condición con mayor frecuencia de valoración negativa fue CF3b, coincidiendo con el resultado mencionado en cuanto a la consistencia de la miga.

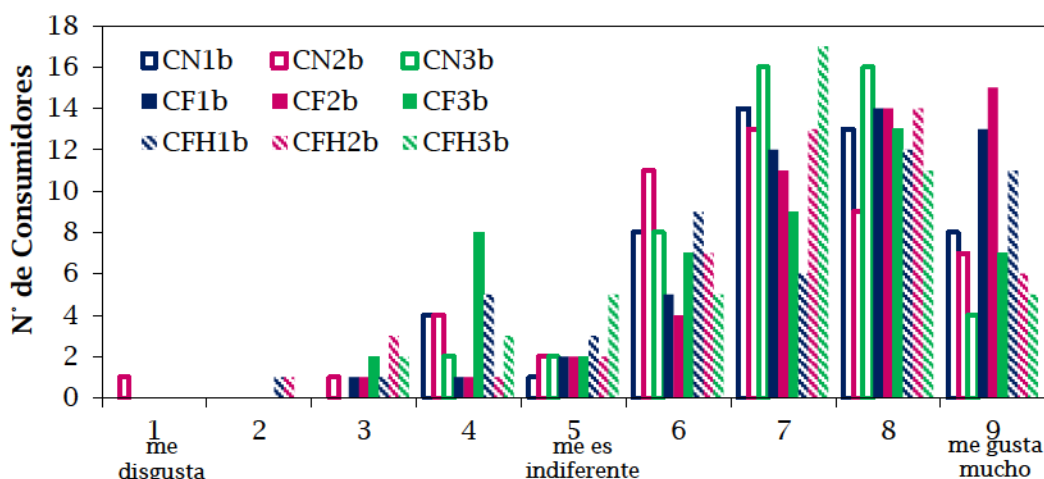


Figura 4.30. Histograma de aceptabilidad de la esponjosidad de la miga.

4.4 Conclusiones

En este capítulo se presentaron los resultados del estudio de la influencia de las condiciones de horneado (temperatura del horno, modo de convección, aporte de vapor de agua a la cámara de horneado) en distintos aspectos de la cocción de bizcochuelo.

El comportamiento de la temperatura interna en la cámara de cocción siguió ondas periódicas, análogas a las encontradas en el horneado de madalena. Nuevamente el sistema de control en las experiencias realizadas con convección natural fue más sensible.

Se registró la evolución de altura de bizcochuelo durante el proceso. La misma fue representada con una función empírica, considerando el tiempo y el radio como variables independientes. La derivada respecto del tiempo de esta expresión permitió calcular la velocidad de expansión utilizada en el modelo matemático.

Los perfiles de temperatura fueron medidos en distintas posiciones, algunas inicialmente se encontraban dentro del volumen de la muestra y otras fueron alcanzadas por el producto a medida que avanzaba la cocción. Del análisis de estas historias térmicas se verificó que la última región en alcanzar un grado de cocción satisfactorio fue la cercana a la corteza superior, alrededor del eje axial. En consecuencia se definió el tiempo mínimo de cocción, como el tiempo en el cual esta zona alcanza valores entre 95 y 98 °C.

En general, el modelo numérico representó satisfactoriamente los perfiles de temperatura medidos experimentalmente en el interior del producto, siendo la predicción de las historias térmicas aún mejor que la obtenida en el modelado del horneado de madalena. El error promedio de la temperatura calculada resulta menor a 7.1 % para todas las condiciones operativas estudiadas, mientras que el t_{\min} predicho por el modelo tiene un error asociado menor a 4.1 %.

En cuanto al consumo energético para la cocción de bizcochuelo, se encontró que está íntimamente relacionado con los tiempos de cocción siendo el modo convección natural el que mayor energía demanda.

La evolución de color superficial, al igual que para madalena siguió un comportamiento de tipo sigmoideo representado por una función tipo dosis-respuesta, con parámetros cinéticos dependientes de la temperatura de cocción. A través de esta cinética se analizó el color superficial a tiempo mínimo de proceso verificándose que en todas las condiciones estudiadas el producto alcanzó un desarrollo importante del color de su corteza.

El seguimiento de la pérdida de peso de bizcochuelo indicó que el producto se deshidrata de manera continua a lo largo de todo el proceso de horneado, dependiendo la velocidad de secado del modo convectivo, y no de la temperatura de operación dentro de cada grupo. A su vez, los resultados de pérdida de peso global siguen las tendencias esperadas, teniendo en cuenta el efecto de la ventilación y de la humidificación en los coeficientes de transferencia de materia. Las mismas fueron similares a las tendencias informadas para madalena. La evolución del contenido de humedad de la corteza y de la miga por separado también concuerda con el comportamiento observado en madalena (la miga presentó mínima disminución de humedad, y la corteza se deshidrató considerablemente).

Teniendo en cuenta la relación corteza/miga y el espesor de corteza de bizcochuelo no se encontraron diferencias significativas entre las distintas condiciones operativas.

Por otro lado, al analizar la estructura de la miga se destaca que para el modo convección natural las menores temperaturas de operación favorecieron un buen desarrollo de la porosidad de la miga. La firmeza de la miga obtenida bajo las condiciones CNb y CFb presentó una leve disminución al aumentar la temperatura de operación y la humidificación generó una estructura menos firme, independiente de la temperatura de operación.

Finalmente los atributos de calidad evaluados obtuvieron para todas las condiciones muy buenos niveles de aceptación, concentrándose las respuestas entre las valoraciones 7 y 9, con la excepción de las muestras horneadas bajo la condición CF3b, las cuales fueron calificadas negativamente respecto de la cantidad de corteza, y la consistencia y la esponjosidad de la miga.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES

Conclusiones generales

En el presente trabajo de tesis se presentaron los resultados del estudio de la influencia de las condiciones de horneado en distintos aspectos de la cocción de productos panificados dulces, en particular de madalena y bizcochuelo. Se analizaron tres modos de cocción: convección natural, convección forzada y convección forzada con humidificación. En cuanto a la temperatura del horno, se seleccionaron cinco valores para el horneado de madalena y tres para el de bizcochuelo.

Respecto al desempeño de ambos equipos utilizados en las experiencias de horneado, la temperatura del interior presentó un comportamiento periódico, típico del control ON-OFF. Se definió una temperatura efectiva, igual a la temperatura promedio, y se determinaron las curvas operacionales que vinculan esta temperatura con la temperatura nominal. En general, la incorporación de vapor provocó dificultad al sistema de control para regular la temperatura.

En ambos productos se caracterizó la expansión volumétrica, determinando expresiones empíricas para cuantificar la evolución de altura en función del tiempo y del radio de las muestras. De las mismas se derivaron las funciones que representan la velocidad de expansión, que fueron incorporadas al modelo matemático.

Los perfiles de temperatura interna de madalena presentaron un comportamiento sigmoideo, con una primera etapa de calentamiento, y una meseta final de estabilización alrededor de 100 °C. De estos perfiles se identificó el tiempo mínimo de cocción. En bizcochuelo, se midió la temperatura en distintas posiciones, del análisis de estas historias térmicas se verificó que la última región en alcanzar un grado de cocción satisfactorio fue la

cercana a la corteza superior, alrededor del eje axial. En consecuencia se definió el tiempo mínimo de cocción, como el tiempo en el cual esta zona alcanza valores entre 95 y 98 °C.

Se desarrolló un modelo matemático para resolver el balance de energía, el cual fue resuelto mediante elementos finitos, considerando propiedades físicas dependientes de la temperatura. El modelo contempló a su vez la deformación de la malla de elementos finitos provocada por la expansión de volumen. En términos generales, el modelo representó adecuadamente el comportamiento experimental registrado en ambos productos durante el horneado. Los errores medios calculados tanto para las temperaturas como para los tiempos mínimos de cocción fueron satisfactorios, excepto para el horneado de madalena bajo convección forzada.

En líneas generales, se encontró que el consumo de energía depende fuertemente del tiempo de cocción, y por ende de la temperatura efectiva de horneado. Debido a esto, el horneado en convección natural demanda mayor aporte de energía, especialmente a bajas temperaturas.

En ambos productos, el color de la corteza superficial se representó adecuadamente a través del índice BI. Las cinéticas de pardeamiento experimentales se caracterizaron mediante parámetros cinéticos dependientes de la temperatura efectiva de horneado.

En madalena, la aplicación de estadística de supervivencia permitió definir un color óptimo en base a la aceptabilidad de los consumidores. Vinculando este color óptimo con el modelo cinético se calculó el tiempo óptimo de cocción.

Los tiempos de proceso (mínimo en ambos productos, óptimo en madalena) disminuyen con el aumento de la temperatura efectiva, en todos los casos se encontraron diferencias significativas entre el modo de convección natural y ambos modos de convección forzada.

En ambos productos se identificaron claramente dos regiones, miga y corteza, la primera mantuvo prácticamente el contenido de humedad de la mezcla inicial, en cambio la segunda presentó una significativa deshidratación. No obstante, los resultados experimentales de pérdida de peso total indicaron que la corteza no actúa como una barrera a la migración de agua, sino que aún en las instancias finales de horneado los productos continúan deshidratándose. Los resultados siguen las tendencias esperadas, teniendo en cuenta el efecto de la ventilación y de la humidificación en los coeficientes de transferencia de materia.

La inyección de vapor en la cámara de horneado presentó beneficios manifestados como menor cantidad y espesor de corteza solo en madalena.

Por otro lado, las características estructurales de madalena se vieron favorecidas por la menor velocidad de calentamiento, típica del modo convección natural.

Finalmente, los ensayos de aceptabilidad sensorial mostraron calificaciones positivas para todas las condiciones. En ambos productos las menores valoraciones fueron para los productos horneados bajo las condiciones con convección forzada, a mayores temperaturas de operación.

Bibliografía

- American Association of Cereal Chemist (AACC, 2000). Approved Methods of AACC.10th Edition. American Association of Cereal Chemist, St. Paul. MN.
- Ahrné L., Andersson C., Floberg P., Rosén J., Lingnert H. Effect of crust temperature and water content on acrylamide formation during baking of white bread: Steam and falling temperature baking. *LWT - Food Science and Technology* 40, 1708-1715.
- Ait Ameer O., Mathieu V., Lalanne G., Trystram I., Birlouez-Aragon L. (2007). Comparison of the effects of sucrose and hexose on furfural formation and browning in cookies baked at different temperatures. *Food Chemistry* 101, 1407-1416.
- Alamir M., Witrant E., Della Valle G., Rouaud O., Josset Ch., Boillereaux L.(2013). Estimation of energy saving thanks to a reduced-model-based approach: Example of bread baking by jet impingement. *Energy* 53, 74-82.
- Altamirano-Fortoul R., Le-Bail A., Chevallier S., Rosell C.M. (2012). Effect of the amount of steam during baking on bread crust features and water diffusion. *Journal of Food Engineering* 108, 128-134.
- Andresen M.S. (2013). Experimentally supported mathematical modeling of continuous baking processes. PhD Thesis, Division of Industrial Food Research, National Food Institute, Technical University of Denmark, Lyngby, Dinamarca.

- AOAC. (1995). Official methods of analysis of the association of official analytical chemists, 5ta ed., Ed. Helrich K, AOAC, Washington DC (EEUU).
- Azcoytia C. (2011). Origen del nombre bizcocho y su historia para conservarlos. <http://www.historiacocina.com/historia/articulos/bizcocho.htm>. Última visita: 04/12/14.
- Baik O.D., Sablani S.S., Marcotte M., Castaigne F. (1999). Modeling the thermal properties of a cup cake during baking. *Journal of Food Science* 64, 295-299.
- Baik O.D., Marcotte M., Castaigne F. (2000a). Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens Part I. Characterization of baking conditions. *Food Research International* 33, 587-598.
- Baik O.D., Marcotte M., Castaigne F. (2000b). Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens Part II. Evaluation of quality parameters. *Food Research International* 33, 599-607.
- Baik O., Marcotte M. (2002). Modeling the moisture diffusivity in a baking cake. *Journal of Food Engineering* 56, 27-36.
- Bikard J., Coupez T., Della Valle G., Vergnes B. (2012). Simulation of bread making process using a direct 3D numerical method at microscale: analysis of baking step. *International Journal of Material Forming* 5, 11-24.
- Bilgen S., Coskuner Y., Karababa E. (2004). Effects of baking parameters on the white layer cake quality by combined use of conventional and microwave ovens. *Journal of Food Processing Preservation* 28, 89-102.
- Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. (2011). Fenómenos de Transporte. Reverte, edición 2011.
- Bonacina C., Comini G., Fasano A., Primicerio M. (1973). Numerical solution of phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 16, 1825-1832.
- Broyart B., Trystram G., Duquenoy A. (1998). Predicting colour kinetics during cracker baking. *Journal of Food Engineering* 35, 351-368.
- Buera M.P., Lozano R.D., Petriella, C. (1986). Definition of colour in the non enzymatic browning process. *Die Farbe* 32/33, 318-322.
- Caffier M. (2006). Il était une fois - La madeleine: Histoire et recettes d'un produit d'exception lorrain. Editorial La Nuée Bleue, Alsace, Lorraine.
- Cauvain S.P. (1991). Evaluating the texture of baked products, *The South African Journal of Food Science & Nutrition* 3(4), 81-6.
- Cauvain S. P. (2004) Improving the texture of bread, Ch. 18: Texture in Foods, Volume 2: Solid foods. Ed. D. Kilcast, CRC Press
- Cauvain S. P., Young L.S. (2006). Baked Products: Science, Technology and Practice. Blackwell Scientific, Oxford.
- Cernela J., Heyd B., Broyart B. (2014). Evaluation of heating performances and associated variability of domestic cooking appliances (oven-baking and pan-frying). *Applied Thermal Engineering* 62, 758-765.

- Channwal N, Indrani D, Raghavarao, KS, Anandharamakrishnan C. (2011). Computational fluid dynamics modeling of bread baking process. *Food Research International* 44, 978-983.
- Chevallier S., Colonna P., Della Valle G., Lourdin D. (2000). Contribution of major ingredients during baking of biscuit dough systems. *Journal of Cereal Science* 31, 241-252.
- Chevallier S., Della Valle G., Colonna P., Broyart B., Trystram G. (2002). Structural and Chemical Modifications of Short Dough During Baking. *Journal of Cereal Science* 35, 1-10.
- Choi Y, Okos M.R. (1986). Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. En: *Food Engineering and Process Applications*, Elsevier Applied Science Publishers, London, 1, 93-101.
- Código Alimentario Argentino (C.A.A.), en el Capítulo IX: "Alimentos Farináceos- cereales, harinas y derivados", bajo el título: "Galletas, galletitas y facturas de panadería", artículos 760, 760 bis, 762 y 766.
- COMSOL AB (2005). *COMSOL Multiphysics Modeling Guide & User's Guide*. COMSOL 3.4.
- De Cindio B., Correria S. (1995). Mathematical modelling of leavened cereal goods. *Journal of Food Engineering* 24, 370-403.
- Decock P., Cappelle S. (2005). Bread technology and sourdough technology. *Trends in Food Science and Technology* 16, 113-120.
- Drake M.A., Miracle R.E., Caudle A.D, Cadwallader K.R. (2007). Ch. 2: Relating sensory and instrumental analyses. *Sensory-Directed Flavor Analysis*, Ed. Taylor and Francis Group, LLC, CRC Press.
- Fehaili S., Courel M., Rega B, Giampaoli P. (2010). An instrumented oven for the monitoring of thermal reactions during the baking of sponge cake. *Journal of Food Engineering* 101, 253-263.
- Ferrari E., Marai S.V., Guidetti R., Piazza, L. (2012). Modelling of heat and moisture transfer phenomena during dry biscuit baking by using finite element method. *International Journal of Food Engineering* 8, article 29.
- Feyissa A.H., Gernaey K., Adler-Nissen J. (2013). 3D modelling of coupled mass and heat transfer of a convection-oven roasting process. *Meat Science* 93, 810-820.
- Garitta L., Serrat C., Hough G., Curia A. (2006). Determination of optimum concentrations of a food ingredient using survival analysis statistics. *Journal of Food Science*, 71(7), 526-532.
- Gibson L.J., Ashby, M.F. (1982). The mechanics of three-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society of London, Serie A*, 382, 43-59.
- Gibson L.J., Ashby M.F. (1997). *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge: University Press, 2 da edición.
- Gökmen V., Açar Ö., Arribas-Lorenzo G., Morales F. (2008). Investigating the correlation between acrylamide content and browning ratio of model cookies. *Journal of Food Engineering* 87, 380-385.

- Gómez M., Ronda F., Caballero P.A., Blanco C.A., Rosell C.M. (2007). Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf-life of yellow layer cakes. *Food Hydrocolloids* 21, 167-173.
- Gonzales-Barron U., Butler F. (2006). A comparison of seven thresholding techniques with the k-means clustering algorithm for measurement of bread-crumbs features by digital image analysis. *Journal of Food Engineering* 74, 268-278.
- Gonzales-Barron U., Butler F. (2008). Fractal texture analysis of bread crumb digital images. *European Food Research and Technology* 226, 721-729.
- Goñi S., Salvadori V. (2010). Prediction of cooking times and weight losses during meat roasting. *Journal of Food Engineering* 100, 1-11.
- Goñi S., Salvadori V. (2012). Model-based multi-objective optimization of beef roasting. *Journal of Food Engineering* 111, 92-101.
- Güemes Vera N., Totosa A., Hernandez J. F., Soto S., Bolaños E. N. (2009). Propiedades de textura de masa y pan dulce tipo "concha" fortificados con proteínas de suero de leche. *Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Campinas* 29(1), 70-75.
- Guitou H., Monti A., Sutz G., Baluk I. (2007). Interpretation and use of expected progeny differences (EPD) as a selection tool for beef quality. Part two. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 20, 363-376.
- Hadiyanto Asselman A., van Straten G., Boom R.M., Esveld D.C., van Boxtel A.J.B. (2007). Quality prediction of bakery products in the initial phase of process design. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 8, 285-298.
- Hough, G., Langohr, K., Gomez, G., & Curia, A. (2003). Analysis applied to sensory shelf-life of foods. *Journal of Food Science* 68(1), 359-362.
- Indrani D., Rao G.V. (2008). Functions of Ingredients in the Baking of Sweet Goods. *Food Engineering Aspects of Baking Sweet Goods. Contemporary Food Engineering* Ch. 2, 31-48.
- Industrial Energy Efficiency Accelerator (IEEA), relevamiento 2011. <http://www.carbontrust.com/client-services/technology/innovation/industrial-energy-efficiency-accelerator>. Última visita: 13/12/2014.
- Isleroglu H., Kemerli T., Sakin-Yilmazer M., Guven G., Ozdestan O., Uren A., Kaymak-Ertekin F. (2012). Effect of steam assisted baking on acrylamide formation and browning kinetics of cookies. *Journal of Food Science* 77, 257-263.
- Jefferson D.R., Lacey A.A., Sadd P.A. (2007). Crust density in bread baking: mathematical modeling and numerical solutions. *Applied Mathematical Modelling* 31, 209-225.
- Jia C., Huang W., Ji L., Zhang L., Li N., Li Y. (2014). Improvement of hydrocolloid characteristics added to angel food cake by modifying the thermal and physical properties of frozen batter. *Food Hydrocolloids* 41, 227-232.

- Kemerli T., Isleroglu H., Sakin Yilmazer M., Guven G., Ozdestan O., Kaymak-Ertekin F., Uren A., Ozyurt B. (2011). Steam assisted baking of cookies as compared to convectional baking. In Proceedings of the 11th International Congress on Engineering and Food, Atenas, Grecia.
- Khatir Z., Paton J., Thompson H., Kapur N., Toropov V., Lawes M., Kirk D. (2012) Computational fluid dynamics (CFD) investigation of air flow and temperature distribution in a small scale bread-baking oven *Applied Energy* 89, 89-96.
- Khatir Z., Paton J., Thompson H., Kapur N., Toropov V. (2013). Optimisation of the energy efficiency of bread-baking ovens using a combined experimental and computational approach. *Applied Energy* 112, 918-927.
- Kocer D., Hicsasmaz Z., Bayindirli A., Katnas S. (2007). Bubble and pore formation of the high-ratio cake formulation with polydextrose as a sugar- and fat-replacer. *Journal of Food Engineering* 78, 953-964.
- Kossoff G. (2000). Basic physics and imaging characteristics of ultrasound. *World Journal of Surgery* 24, 134-42.
- Lara E., Cortés, P., Briones, V., Pérez M. (2011). Structural and physical modifications of corn biscuits during baking process. *LWT - Food Science and Technology* 44, 622-630.
- Lassoued N., Babin P., Della Valle G., Devaux M. F., Reguerre A. L. (2007). Granulometry of bread crumb grain: Contributions of 2D and 3D image analysis at different scale. *Food Research International* 40, 1087-1097.
- Lassoued N., Delarue J., Launay B., Michon C. (2008). Baked product texture: correlations between instrumental and sensory characterization using flash profile. *Journal of Cereal Science* 48, 33-143.
- Le-Bail A., Boumali K., Jury V., Ben-Aissa F., Zuniga R. (2009). Impact of baking kinetics on staling rate and mechanical properties of bread crumb and degazed bread crumb. *Journal of Cereal Science* 50, 235-240.
- Le-Bail A., Dessev T., Jury V., Zuniga R., Park T., Pitroff M. (2010). Energy demand for selected bread making processes: conventional versus part baked frozen technologies. *Journal of Food Engineering* 96, 510-519.
- Le-Bail A., Dessev T., Leray D., Lucas T., Mariani S., Mottollese G., Jury V. (2011). Influence of the amount of steaming during baking on the kinetic of heating and on selected quality attributes of bread. *Journal of Food Engineering* 105, 379-385.
- Lezcano E.P. (2011). Productos Batidos. Alimentos Argentios, Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca 52, 16-32.
- López Osornio M.M., Hough G., Salvador A., Chambers E., McGraw S., Fiszman S.M. (2008). Beef's optimum internal cooking temperature as seen by consumers from different countries using survival analysis statistics. *Food Quality and Preference* 19, 12-20.

- Lostie, M. (1998). Etude expérimentale et numérique de la cuisson d'une pâte à gâteau foisonnée. Tesis doctoral, Université Claude Bernard Lyon, Francia.
- Lostie M., Peczalski R., Andrieu J., Laurent, M. (2002a). Study of sponge cake batter baking process. Part I: Experimental data. *Journal of Food Engineering* 51, 131-137.
- Lostie M., Peczalski R., Andrieu J., Laurent, M. (2002b). Study of sponge cake batter baking process. Part II: Modeling and parameter estimation. *Journal of Food Engineering* 55, 349-347.
- Lostie M., Peczalski R., Andrieu J. (2004). Lumped model for sponge cake baking during the "crust and crumb" period. *Journal of Food Engineering* 65, 281-286.
- Marcotte M. (2005). Volume expansion of cake during baking and its influence on cake qualities. *AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings*, 12378-12385.
- Martinez-Cervera S., Salvador A., Muguerza B., Moulay L., Fiszman S.M. (2011). Cocoa fibre and its application as a fat replacer in chocolate muffins. *LWT- Food Science and Technology* 44, 729-736.
- Martínez-Cervera S., Sanz T., Salvador A., Fiszman S.M. (2012). Rheological, textural and sensorial properties of low-sucrose muffins reformulated with sucralose /polydextrose. *LWT- Food Science and Technology* 45, 213-220.
- Martinez-Cervera S., de la Hera E., Sanz T., Gómez M., Salvador A. (2013). Effect of nutriose on rheological, textural and sensorial characteristics of spanish muffins. *Food Bioprocess Technology* 6, 1990-1999.
- Martínez-Cervera S., Salvador A., Sanz T. (2014). Comparison of different polyols as total sucrose replacers in muffins: Thermal, rheological, texture and acceptability properties. *Food Hydrocolloids* 35, 1-8.
- Matos M.E., Sanz T., Rosell C.M. (2014). Establishing the function of proteins on the rheological and quality properties of rice based gluten free muffins. *Food Hydrocolloids* 35, 150-158.
- Meilgaard M., Civille G., Carr B. (2006). *Sensory Evaluation Techniques*. 4th Edition. CRC Press, Boca Raton, Florida, EEUU.
- Meziani S., Kaci M., Jacquot M., Jasniewski J., Ribotta P., Muller J.M., Ghoul M., Desobry S. (2012). Effect of freezing treatments and yeast amount on sensory and physical properties of sweet bakery products. *Journal of Food Engineering* 111, 336-342.
- Mizukoshi M., Maeda H., Amano H. (1980). Model studies of cake baking. II. Expansion and heat set of cake batter during baking. *Cereal Chemistry* 57, 352-355.
- Mohd Jusoh Y.M., Chin N.L., Yusof Y.A., Abdul Rahman R. (2009). Bread crust thickness measurement using digital imaging and L a b colour system. *Journal of Food Engineering* 94, 366-371.
- Mondal A., Datta A.K. (2008). Bread baking-A review. *Journal of Food Engineering* 86, 465-474.

- Morr C.V., Hoffmann W., Buchheim W.(2003). Use of applied air pressure to improve baking properties of whey protein isolates in angel food cakes. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 36, 83-90.
- Moskowitz H. R. (1995). *Food Quality and Performance*, 157-162. Elsevier Science Limited Gran Bretaña.
- Mundt S., Wedzicha B. (2007). A kinetic model for browning in the baking of biscuits: Effects of water activity and temperature. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 40, 1078-1082.
- Olivera D.F., Salvadori V.O. (2006). Textural characterisation of lasagna made from organic whole wheat. *Journal of Food Science and Technology* 41 (2), 63-69.
- Olivera D.F., Salvadori V.O. (2009). Effect of freezing rate in textural and rheological characteristics of frozen cooked organic pasta. *Journal of Food Engineering* 90, 271-276.
- Olszewski E.A. (2006). From baking a cake to solving the diffusion equation. *American Association of Physics Teachers* 74, 502-509.
- Onyango C., Mutungi C., Unbehend G., Lindhauer M.G. (2010). Rheological and baking characteristics of batter and bread prepared from pregelatinised cassava starch and sorghum and modified using microbial transglutaminase. *Journal of Food Engineering* 97, 465-470.
- Paton J., Khatir Z., Thompson H., Kapur N., Toropov V. (2013) Thermal energy management in the bread baking industry using a system modelling approach. *Applied Thermal Engineering* 53, 340-347.
- Pérez-Nieto A., Chanona-Pérez J.J., Farrera-Rebollo R.R., Gutiérrez-López G.F., Alamilla-Beltrán L., Calderón-Domínguez G. (2010). Image analysis of structural changes in dough during baking. *LWT - Food Science and Technology* 43, 535-543.
- Perry R. H., Green D. W. (1997). *Manual del ingeniero químico*, McGraw-Hill, 7^{ma} edición.
- Ploteau J.P., Nicolas V., Glouannec P. (2012). Numerical and experimental characterization of a batch bread baking oven. *Applied Thermal Engineering* 48, 289-295.
- Purlis E., Salvadori V.O. (2009a). Modelling the browning of bread during baking. *Food Research International* 42, 865-870.
- Purlis E., Salvadori V.O. (2009b). Bread baking as a moving boundary problem. Part 1: Mathematical modelling *Journal of Food Engineering* 91, 428-433
- Purlis E., Salvadori V.O. (2010). A moving boundary problem in a food material undergoing volume change. *Simulation of bread baking. Food Research International* 43, 949-958.
- Purlis E. (2011). Bread baking: Technological considerations based on process modelling and simulation. *Journal of Food Engineering* 103, 92-102.
- Purlis E. (2012). Baking process design based on modelling and simulation: Towards optimization of bread baking. *Food Control* 27, 45-52.

- R 3.0.1 Development Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Rask C. (1989). Thermal properties of dough and bakery products: a review of published data. *Journal of Food Engineering* 9, 167-193.
- Rouillé J, Della Valle G., Lefebvre J., Sliwinski E., vanVliet T. (2005). Shear and extensional properties of bread doughs affected by their minor components. *Journal of Cereal Science* 42, 45-57.
- Sakin M., Kaymak-Ertekin F., Ilicali C. (2007a). Modeling the moisture transfer during baking of white cake. *Journal of Food Engineering* 80, 822-831.
- Sakin M, Kaymak-Ertekin F, Ilicali C. (2007b). Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking. *Journal of Food Engineering* 83, 463-474.
- Sakin-Yilmazer M., Kaymak-Ertekin F., Ilicali C. (2012). Modeling of simultaneous heat and mass transfer during convective oven ring cake baking. *Journal of Food Engineering* 111, 289-298.
- Sakin-Yilmazer M., Kemerli T, Isleroglu H., Ozdestan O., Guven G., Uren A., Kaymak-Ertekin F. (2013). Baking kinetics of muffins in convection and steam assisted hybrid ovens. *Journal of Food Engineering* 119, 483-489.
- Santos M.V., Vampa V., Califano A., Zaritzky N. (2010). Numerical simulations of chilling and freezing processes applied to bakery products in irregularly 3D geometries. *Journal of Food Engineering* 100, 32-42.
- Schirmer M., Hussein W.B., Jekle M., Hussein M.A. Becker T. (2011). Impact of air humidity in industrial heating processes on selected quality attributes of bread rolls *Journal of Food Engineering* 105, 647-655.
- Scholtz S.C., Bosman M.J.C. (2005). Consumer acceptance of high fibre muffins and rusks baked with red palm olein. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 857-866.
- Shearer A.E, Davies C. (2005). Physicochemical properties of freshly baked and stored whole-wheat muffins with and without flaxseed meal. *Journal of Food Quality* 28, 137-153.
- Shehzad A., Chiron H., Della Valle G., Kansou K., Ndiaye A., Réguerre A. L. (2010). Porosity and stability of bread dough during proofing determined by video image analysis for different compositions and mixing conditions. *Food Research International* 43, 1999-2005.
- Shelke K., Faubion J.M., Hoseney R.C. (1990). The dynamics of cake baking as studied by a combination of viscometry and electrical resistance oven heating. *Cereal Chemistry* 67 (6), 575-580.
- Sommier A., Chiron H., Colonna P., Della Valle G., Rouille J. (2005). An instrumented pilot scale oven for the study of French bread baking. *Journal of Food Engineering* 69 (1), 97-106.

- Sosa M., Flores A., Hough G., Apro N., Ferreyra V., Orbea M.M. (2008). Optimum Level of Salt in French-Type Bread. Influence of Income Status, Salt Level in Daily Bread Consumption, and Test Location. *Journal of food science* 73 (8), 392-397.
- Sosa-Morales M.E., Guerrero-Cruz H.G., Velez-Ruiz J.F. (2004). Modelling of heat and mass transfer during baking of biscuits. *Journal of Food Processing and Preservation* 28, 417-432.
- Sumnu G., Ndife M.K., Bayindirli L. (2000). Optimization of microwave baking of model layer cakes. *European Food Research and Technology* 211, 169-174.
- Sumnu G., Sahin S., Sevimli M. (2005). Microwave, infrared and infrared-microwave combination baking of cakes. *Journal of Food Engineering* 71 (2), 150-155.
- Szczesniak A.S. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference* 13 (4), 215-225.
- Therdthai N., Zhou, W., Adamczak T. (2002). Optimisation of the temperature profile in bread baking. *Journal of Food Engineering* 55, 41-48.
- Thorvaldsson K., Janestad H. (1999). A model for simultaneous heat, water and vapour diffusion. *Journal of Food Engineering* 40, 167-172.
- Tireki S. (2008). Technology of Cake Production. *Food Engineering Aspects of Baking Sweet Goods. Contemporary Food Engineering*. Ch.7, 149-158.
- Turabi E., Sumnu G., Sahin S. (2008). Optimization of baking of rice cakes in infrared-microwave combination oven by response surface methodology. *Food Bioprocess Technology* 1, 64-73.
- Vanin F.M., Lucas T., Trystram G. (2009). Crust formation and its role during bread baking. *Trends in Food Science and Technology* 20, 333-343.
- Wagner M., Lucas T., Le ray G., Trystram G. (2007). Water transport in bread during baking. *Journal of Food Engineering* 78, 1167-1173.
- Wagner M., Quellec S., Trystram G., Lucas T. (2008). MRI evaluation of local expansion in bread crumb during baking. *Journal of Cereal Science* 48, 213-223.
- Wählby U., Skjöldebrand C. (2002). Reheating characteristics of crust formed on buns, and crust formation. *Journal of Food Engineering* 53, 177-184.
- Xue J., Lefort G., Walker C.E. (2004). Effects of oven humidity on foods baked in gas convection ovens. *Journal of Food Processing Preservation* 28, 179-200.
- Yilmazer S., Isleroglu H., Kemerli T., Ozdestan O., Guven G., Kaymak-Ertekin F., Uren A., Ozyurt B. (2011). Quality characteristics and drying behavior of muffins baked in steam assisted and convectional ovens. In *Proceedings of the 11th International Congress on Engineering and Food*, Athens, Greece.
- Zanoni, B., Peri, C. (1993). A Study of the Bread-Baking Process. I: A Phenomenological Model. *Journal of Food Engineering* 19, 389-398
- Zanoni, B., Pierucci, S., Peri, C. (1994). A study of the Bread-Baking Process. II. Mathematical Modelling. *Journal of Food Engineering* 23, 321-336.

- Zanoni B., Peri C., Bruno D. (1995). Modelling of Browning Kinetics of Bread Crust During Baking. LWT - Food Science and Technology, 28, 604-609.
- Zareifard M.R., Boissonneault V., Marcotte M. (2009). Bakery product characteristics as influenced by convection heat flux. Food Research International 42, 856-864.
- Zhang J., Datta A.K. (2006). Mathematical modeling of bread baking process. Journal of Food Engineering 75, 78-89.
- Zhang L., Lucas T., Doursat C., Flick D., Wagner M. (2007). Effects of crust constraints on bread expansion and CO₂ release. Journal of Food Engineering 80, 1302-1311.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (1994). El método de los elementos finitos. McGraw-Hill, Barcelona, España, 4^{ta} edición.