



Facultad de Veterinaria
Universidad Zaragoza



Trabajo Fin de

Autor/es

Director/es

Facultad de Veterinaria

INFLUENCIA DEL RÉGIMEN DE EBULLICIÓN EN LA TRANSMISIÓN DE CALOR A LOS ALIMENTOS

Índice

1. Resumen.....	2
2. Introducción	3
3. Justificación y Objetivos	9
4. Metodología	11
4.1. Búsqueda bibliográfica de propiedades termofísicas	11
4.2. Determinación de las condiciones para las que no es posible despreciar la resistencia convectiva a la transmisión de calor.	11
4.3. Metodología para determinar los coeficientes convectivos a diferentes potencias.	12
4.3.1. Experimentación para determinar la evolución de la temperatura en el centro térmico del alimento.	12
4.3.2. Modelado matemático de la transmisión de calor durante la cocción.	14
4.4. Metodología experimental para la determinación de la evolución de la conductividad térmica del agua de cocción.	16
5. Resultados y Discusión	17
5.1. Condiciones para las que no es despreciable la resistencia a la transmisión de calor por conducción.....	17
5.2. Coeficientes convectivos para diferentes regímenes de ebullición	23
5.3. Influencia de la potencia suministrada durante la cocción en la lixiviación de compuestos del alimento al agua de cocción.	27
6. Conclusiones.....	29
7. Valoración personal.....	31
8. Bibliografía	33
9. Anexos	38

1. Resumen

La hipótesis de la que parte este trabajo es que la potencia calefactora suministrada durante la cocción de alimentos por inmersión en agua hirviendo puede influir en la transmisión de calor de los alimentos. A pesar de que el agua de cocción no cambia su temperatura tras alcanzar el hervor, la diferente fluidodinámica que se genera, por una distinta turbulencia debida a burbujas de diferente tamaño y número, puede repercutir en el coeficiente convectivo de transmisión de calor. Para comprobar esta hipótesis se ha determinado el valor del coeficiente convectivo para diferentes potencias suministradas. Para ello, se ha partido de datos experimentales de perfiles térmicos en el alimento y de un modelado matemático que describe los mecanismos de transmisión de calor. Los valores obtenidos han sido 250 y 500 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ para 2010 y 753 W, respectivamente. Además se ha realizado una búsqueda bibliográfica para recopilar los valores de las propiedades térmicas de mayor implicación en la transmisión de calor (conductividad y difusividad térmica) en los alimentos que habitualmente se cocinan hervidos. A partir de estos datos, y de los valores experimentales de los coeficientes convectivos se ha podido cuantificar en qué condiciones no es despreciable la potencia aplicada en la transmisión de calor. De 22 alimentos estudiados, en 14 de ellos puede influir la potencia aplicada en la velocidad de calentamiento. El estudio paramétrico del modelo planteado ha permitido cuantificar la influencia de la conductividad térmica y del coeficiente convectivo en los perfiles térmicos en el alimento. El tiempo de cocinado apenas se puede reducir cuando se aplica mayor potencia puesto que los perfiles térmicos para los diferentes regímenes de ebullición son similares. Adicionalmente, se ha estudiado la influencia de los diferentes regímenes de ebullición en la transferencia de materia por lixiviación desde el alimento hacia el agua de cocción, concluyéndose que el alimento pierde mayor cantidad de sustancias a regímenes de ebullición más vigorosos.

INFLUENCE OF BOILING REGIME ON HEAT TRANSFER TO FOOD

Abstract

The hypothesis of this work is that the heating power supplied during the cooking of food by immersion in boiling water can influence the heat transmission of food. Although the cooking water does not change its temperature after boiling, the different fluid dynamics generated by a different turbulence due to bubbles of different size and number can affect the convective heat transfer coefficient. To verify this hypothesis, the value of the convective coefficient for different powers supplied has been determined. To do this, we started with experimental data of thermal profiles in food and a mathematical modeling that describes the mechanisms of heat transmission. The obtained values have been 250 and 500 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ for 2010 and 753 W, respectively. In addition, a bibliographic search was carried out to collect the values of the thermal properties with the greatest involvement in heat transmission (conductivity and thermal diffusivity) in foods that are usually cooked boiled. From these data, and from the experimental values of the convective coefficients, it has been possible to quantify under what conditions the power applied in the heat transmission is not negligible. Of the 22 foods studied in 14 of them, the power applied in the heating rate can influence. The parametric study of the proposed model has allowed to quantify the influence of the thermal conductivity and the convective coefficient in the thermal profiles in the food. The cooking time can hardly be reduced when more power is applied since the thermal profiles for the different boiling rates are similar. Additionally, the influence of the different boiling regimes on the transfer of matter by leaching from the food to the cooking water has been studied, concluding that the food loses a greater quantity of substances at more vigorous boiling regimes.

2. Introducción

Tanto en las preparaciones culinarias domésticas como en la industria alimentaria, es común que el tratamiento de alimentos implique una transferencia de calor de un medio

fluido al alimento sólido. Esta transferencia ocurre en diversos procesos como la deshidratación, congelación, refrigeración o en diferentes tratamientos térmicos como el cocinado. En una cocción con agua hirviendo en condiciones normales de presión, la temperatura se mantiene a 100°C, pero la potencia utilizada influye mucho en el régimen de ebullición debido a que se modifica la turbulencia, la forma y el tamaño de las burbujas formadas. Este efecto es visualmente apreciable en una cocción doméstica, en la que se aprecia un hervor más enérgico cuanto mayor sea la potencia aportada por el elemento calefactor.

Para evaluar el efecto que tiene la potencia o el régimen que sigue una ebullición durante la cocción de un alimento en la transferencia de calor al mismo, se requiere conocer los parámetros que rigen esta transferencia de calor, bajo condiciones de proceso controladas.

La conductividad térmica (k), el calor específico (Cp) y la densidad (ρ) son parámetros importantes para el diseño y análisis del procesado de alimentos. La difusividad térmica (α) relaciona estos tres, y define cómo de rápido se propaga o se difunde el calor a través de un alimento (Singh, 1982) y generalmente se ve afectado por la composición del mismo.

El coeficiente de transferencia de calor por convección (h) es otro parámetro importante. Éste cuantifica la transmisión de calor al alimento por convección. En el caso de la cocción por inmersión en agua hirviendo, indica la facilidad con la que el calor se transmite desde el medio de cocción hasta la superficie del alimento, y depende principalmente de las características del alimento (forma y dimensión), cambios en la temperatura y rugosidad superficial, y características del medio de cocción en contacto con el alimento (velocidad y turbulencia), (Erdogdu et al., 1998).

Tanto la difusividad térmica como el coeficiente convectivo se requieren conocer previamente a cualquier estudio de tecnología de los alimentos relacionado con procesos térmicos. Se requiere además un análisis separado y detallado para determinar los valores precisos (Assan et al., 2000). Por lo tanto, la determinación experimental de esos parámetros ha sido expuesta a mucha investigación.

En la literatura se describen varios métodos de medida de estas propiedades térmicas en alimentos. Cada una de ellas tiene ventajas e inconvenientes, ya que difícilmente

encontramos técnicas expuestas a ningún tipo de error. Esto lo muestra ya Nesvadba (1982) en un estudio de los diferentes métodos de medida de la difusividad y conductividad térmica de productos alimenticios.

En cuanto a la determinación de los parámetros termofísicos de un alimento, (κ , C_p , ρ , α), existen muchos modelos para su predicción en base a la composición, específicamente, grasas, carbohidratos, proteínas, contenido de fibra, agua y ceniza, y a la temperatura (Phinney et al., 2017). Uno de los métodos más habituales para conocer todos los parámetros termofísicos de un alimento, es el uso de modelos predictivos matemáticos, como las ecuaciones de Choi y Okos (1986), las cuales, conociendo la composición y temperatura de un alimento, nos permiten determinar su densidad, calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica.

Existen estudios basados en cálculos de fluidodinámica computacional que permiten calcular el valor del coeficiente de transmisión de calor por convección, h , a partir de datos experimentales. La opción más común es medir el perfil de tiempo-temperatura en un alimento o réplica, bien sea de materiales con propiedades similares a los alimentos, o de materiales con alta conductividad como el aluminio. Esto último permite más precisión debido a que la posición de la sonda de temperatura no es tan relevante. El uso de alimentos, por otro lado, permite que las condiciones de transferencia de calor sean más realistas (Feyissa et al., 2015). Esto se debe a que para distintos objetos o materiales controla más la convección o la conducción en cuanto a transferencia del calor. El número de Biot (Bi) es un parámetro adimensional que relaciona la transferencia de calor por convección hasta la superficie del alimento, con la transferencia por conducción en su interior. Para números de Biot mayores de 40, el coeficiente de transmisión de calor por convección es muy grande, lo cual indica que no existe resistencia superficial al transporte de calor. Para $Bi < 0,1$, únicamente controla la transmisión por convección. En el caso de los alimentos esta situación es poco frecuente porque se requiere de una alta conductividad térmica propia de materiales como los metales.

En un trabajo de Feyissa et al. (2015), se estudia el coeficiente de transferencia de calor por convección en recipientes de cocinado usando patatas como objetos para la medición. En este estudio, la transmisión de calor en la patata se determina midiendo la

distancia desde la superficie hasta el frente de gelatinización mediante análisis digital de imagen. Conociendo esa distancia, la temperatura de gelatinización, el periodo de inmersión y el radio promedio de la patata (se escogió una variedad aproximadamente esférica). Se calcula el valor h mediante un programa de simulación numérica basado en fluidodinámica computacional, se compara el perfil de distancias hasta el frente de gelatinización en el tiempo, obtenido con distintos valores de h , con el perfil obtenido experimentalmente, hasta minimizar el error de h y obtener su valor preciso. En ese mismo estudio se realizaron varias formas de medición de cómo avanza la temperatura con el tiempo. En una de ellas se usaba un recipiente cortado por la mitad, con una placa de vidrio a la que estaba pegada la patata, de forma que se podía inspeccionar visualmente el proceso. En otra de ellas enfriaba la muestra y se medía el espesor de la patata gelificada, facilitando la visión con yodo. Este estudio se realizó a diferentes temperaturas del medio de cocción pero sin llegar a alcanzar la condición de ebullición del agua.

En otro estudio llevado a cabo en 2003 por Denys et al., se calculó el coeficiente convectivo durante el cocinado de huevos, usando dos enfoques: uno mediante fluidodinámica computacional, y otro experimental. Lo característico de este estudio es que se tiene muy en cuenta el análisis de la geometría del contorno de la cáscara, debido a que la forma difiere mucho de una esfera, y esto afecta a los resultados. Por otra parte, el huevo se rellena de un medio conductor, en este caso agar, con propiedades térmicas y físicas conocidas, y se utilizan sondas de temperatura en diferentes puntos del interior.

La estimación del coeficiente convectivo mediante técnicas de análisis numérico de mínimos cuadrados, usando un conjunto de datos experimentales de tiempo-temperatura, fue propuesta por primera vez por Beck (1963). Hoy en día, los métodos para la determinación de los datos experimentales van desde las metodologías simples por sondas hasta los métodos sofisticados modernos que usan pulsos de láser y detectores de infrarrojos para medir el tiempo para que el pico en una onda térmica pase a través del alimento (Cernuschi et al., 2004; Woodfield et al., 2007).

Por tanto, en vista de los trabajos recogidos en la bibliografía, se puede concluir que en la mayoría de los casos el enfoque matemático para la determinación del coeficiente convectivo se basa principalmente en el uso de soluciones analíticas o numéricas de las ecuaciones que rigen la transferencia de calor en productos de forma regular a través de

datos de tiempo-temperatura obtenidos experimentalmente. Ramesh y Sathyarayana (1997) determinaron el coeficiente de transferencia de calor en el cocinado a vapor de vegetales usando las medidas de temperatura en su centro térmico y aplicando soluciones analíticas. Awuah et al. (1995) realizó una comparación detallada de dos metodologías de obtención del coeficiente de transferencia de calor. Ambos métodos se basaban en el uso de datos tiempo-temperatura obtenidos de objetos regulares y sus soluciones analíticas.

Aunque existen diferentes métodos para determinar el coeficiente de transferencia de calor convectivo, generalmente se acepta que este se debe conocer cuando el objetivo es determinar el valor de la difusividad térmica. Por ello, existe también un enfoque general que trata de asumir como infinito el coeficiente de transmisión de calor, lo cual implica considerar constante la temperatura de superficie para abordar la determinación de la difusividad térmica. Sin embargo, la pregunta en este caso sería si el valor real de la difusividad térmica se puede obtener con esta suposición. Según lo indicado por Verboven et al. (1997), las condiciones de la superficie deben ser conocidas con precisión para que los cálculos de transferencia de calor se interpreten correctamente. Nicolai y De Baerdeameker (1996) demostraron también que pequeñas desviaciones en el coeficiente de transferencia de calor pueden dar lugar a grandes desviaciones especialmente cuando este coeficiente es pequeño. Palazoglu (2006) también realizó una discusión de los efectos de altos y bajos coeficientes de transferencia de calor en la propagación del calor. Concluyó que la velocidad de la penetración del calor era función de una combinación de la difusividad térmica y del coeficiente de transferencia de calor. Por lo tanto, asumir un coeficiente infinito sin conocer su valor real podía conducir a resultados incorrectos en diferentes análisis.

Larkin y Steffe (1982) dieron un análisis de error detallado al estimar la difusividad térmica a partir de datos de penetración de calor. Uno de los parámetros investigados en este estudio fue la suposición del coeficiente de transferencia de calor. Concluyeron que se obtuvo una mayor precisión a números de Biot altos.

Sin embargo, son muchos los trabajos en los que la determinación de la difusividad térmica depende de una suposición en el valor del coeficiente convectivo. Kee et al. (2002) usaron medidas de temperatura del centro del alimento para obtener datos de la difusividad térmica de piensos. Markowski et al. (2004) usaron soluciones analíticas

con una temperatura superficial constante (resultado de asumir un coeficiente de transmisión de calor infinito), para determinar la difusividad térmica de salchichas. Galvina et al. (2006) usaron una metodología de funciones de transferencia para estimar la difusividad térmica de alimentos a partir de registros de tiempo-temperatura obtenidos en sus centros geométricos.

Contrario a este enfoque, donde se requiere conocer el coeficiente de transmisión de calor, Monde y Mitsutake (2001) propusieron un método para determinar el valor de la difusividad térmica resolviendo la ecuación de conducción de calor en estado no estacionario, basándose en medidas en dos puntos de materiales sólidos o semi-sólidos. Su metodología propuesta era realmente independiente de las condiciones de superficie o, en este caso, del coeficiente de transferencia de calor.

La determinación del coeficiente convectivo de transmisión de calor pasa pues, en muchos de los estudios llevados a cabo por el ajuste de datos experimentales en los que se ha determinado la temperatura en algún punto del alimento. Sin embargo, la precisión en la localización de la sonda ha preocupado a numerosos investigadores en este campo. Palazoglu (2006) determinó la influencia del coeficiente de transferencia de calor por convección en el calentamiento de materiales con distinta difusividad térmica y señaló la importancia de este tema. Erdogan (2005) explica también el significado de la determinación simultánea de la difusividad térmica y el coeficiente de transmisión de calor con una discusión detallada de los métodos basados en la aplicación de soluciones analíticas mediante el uso de historiales de tiempo-temperatura. También señaló que el conocimiento de la localización donde se obtienen los registros de tiempo-temperatura juega un papel crucial para la determinación simultánea, y podría no ser tarea fácil determinar la localización con precisión. Carciofi et al. (2002), determinaron la difusividad térmica de mortadela a partir de datos experimentales utilizando una estimación de mínimos cuadrados. En su estudio comentan la importancia de una ubicación geométrica precisa del termopar introducido en la muestra para medir los cambios de temperatura. Gordon y Thorne (1990) describieron una metodología en alimentos esféricos para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección, la conductividad térmica y el calor específico usando la densidad y datos de tiempo-temperatura experimentales obtenidos en dos puntos dentro de la muestra (en el centro, y a mitad de camino entre el centro y la superficie). También discutieron los errores de posición de las sondas y sus efectos. Sin embargo, existe una situación

concreta en la cual no es tan relevante la posición de la sonda, y consiste en el uso de metales para la determinación de la difusividad térmica. En este caso, la temperatura en el interior del objeto es más homogénea que en alimentos y por lo tanto no es importante asegurar tanta precisión en la localización de la sonda.

Aunque existen numerosos trabajos en la bibliografía sobre la transmisión de calor durante el calentamiento de alimentos, la mayoría se centran en procesos en los que no se alcanzan las condiciones de ebullición del fluido que rodea al alimento. Un ejemplo son los estudios sobre escaldado de diferentes productos vegetales. Así, Iribe-Salazar et al. (2015), trataron de conocer la transferencia de calor durante el escaldado y enfriamiento del brócoli. Tras medir las propiedades termofísicas del tallo y de la inflorescencia a diferentes temperaturas y desarrollar un modelo de elementos finitos tridimensionales para predecir el historial de temperaturas en diferentes puntos dentro del producto, se llevó a cabo una comparación entre los resultados teóricos y experimentales.

Fasina y Fleming (2001) también estudiaron la transferencia de calor durante el escaldado de pepinos. Usaron ecuaciones de difusión de calor bidimensionales (coordenadas cilíndricas) para simular las características de transferencia de calor de los pepinos durante el escaldado y se midieron las propiedades termo-físicas necesarias (conductividad térmica, calor específico y densidad) para resolver la ecuación de transferencia de calor. La temperatura (20-95° C) no afectó significativamente a la conductividad térmica ni al calor específico del pepino. Los resultados mostraban que coeficientes de transferencia de calor entre 500-6000 W/m²K no tenían efectos significativos en la temperatura superficial y central de los pepinos durante el escaldado.

3. Justificación y Objetivos

Entre los múltiples métodos posibles de cocción de vegetales, el hervido sigue siendo uno de los más habituales (Clarke & Evans, 2016), aunque cuando se comparan diferentes métodos de cocción, la cocción por inmersión en agua hirviendo suele ser uno de los métodos con el que los vegetales retienen menos nutrientes, debido fundamentalmente a que la combinación temperatura/tiempo requerida produce su degradación térmica y a la lixiviación de compuestos en el agua de cocción (Fabbri &

Crosby, 2016). Para establecer las condiciones en las que un vegetal se ha hervido, las únicas condiciones que se especifican son si se ha realizado en olla a presión o no, y el tiempo de cocción. Sin embargo, la potencia es un parámetro que puede modificarse en todos los equipos de cocción y que es determinante en el desarrollo del proceso puesto que de ella depende la fluidodinámica del medio de cocción, pudiéndose llevar a cabo el proceso de cocción en diferentes regímenes de ebullición dependiendo de la turbulencia generada por el número y tamaño de burbujas formadas.

En el grupo de investigación de Alimentos de Origen Vegetal, se han llevado a cabo estudios en los que se ha concluido que las pérdidas nutricionales durante la cocción de vegetales dependen del régimen de ebullición y por lo tanto de la potencia aplicada durante el hervido. Por otra parte se ha comprobado que los daños estructurales que sufre la pasta, sobretodo la rellena, durante su cocción se pueden minimizar si se selecciona adecuadamente la potencia aportada de manera que el hervor se desarrolle con la menor turbulencia posible.

En otro aspecto en el que la vigorosidad de la ebullición puede influir es en la transmisión de calor desde el agua de cocción hasta el alimento. Este punto es el que se aborda en este trabajo, siendo el objetivo principal del mismo estudiar cómo influye la potencia que se suministra durante la cocción al modo en que se transfiere el calor al alimento. Para alcanzar este objetivo global se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Determinar en qué condiciones no es posible despreciar el término convectivo en el cómputo de la transmisión de calor durante la cocción de alimentos. Para ello se ha realizado una búsqueda bibliográfica de las propiedades térmicas de diferentes alimentos que habitualmente se cocinan hervidos, para los cuales se ha calculado el valor del coeficiente convectivo de transmisión de calor a partir del cual la resistencia a la transmisión de calor por convección es tan pequeña que puede despreciarse y que por lo tanto el régimen de ebullición afecta a la velocidad de su calentamiento.

- Determinar cómo varía el coeficiente convectivo de transmisión de calor con la potencia suministrada durante la cocción a partir de la evolución de la temperatura

en el centro térmico del alimento. Los coeficientes convectivos se han calculado resolviendo las ecuaciones diferenciales de transmisión de calor en estado no estacionario mediante un programa de simulación numérica basado en fluidodinámica computacional, de forma que se minimicen las diferencias entre los perfiles de temperatura –tiempo experimentales y los obtenidos a partir de la simulación.

-El diferente número y tamaño de burbujas generado cuando se aplica una potencia u otra puede influir, además de en el coeficiente convectivo de transmisión de calor, en la transferencia de materia desde el alimento al agua de cocción. Por lo tanto, el tercer objetivo es cuantificar si se incorporan al agua durante la cocción una cantidad diferente de compuestos dependiendo del régimen de ebullición. Para ello se ha realizado una experimentación en la que se determina cómo cambia la conductividad eléctrica del agua durante la cocción a diferentes potencias.

4. Metodología

4.1. Búsqueda bibliográfica de propiedades termofísicas

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica con el fin de obtener los valores de las siguientes propiedades de los alimentos habitualmente consumidos mediante cocción y necesarios para resolver las ecuaciones que rigen la transmisión de calor: densidad, calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica. Esta búsqueda se ha llevado a cabo en libros y artículos científicos que recopilan propiedades de los alimentos. Además, se ha realizado una búsqueda en artículos científicos en los que los autores determinan experimentalmente las propiedades térmicas de diferentes alimentos, que para su estudio necesitan conocer y que no estaban recogidos en la bibliografía existente.

4.2. Determinación de las condiciones para las que no es posible despreciar la resistencia convectiva a la transmisión de calor.

Tras la búsqueda bibliográfica, para los diferentes alimentos de los que se disponía de datos de sus propiedades termofísicas, se determinaron las condiciones para las que no

es despreciable la resistencia al transporte de calor por convección utilizando para ello una hoja de cálculo Excel (ver Anexo). A cada alimento se le asignó una geometría y un tamaño habitual de consumo, y se calculó el valor del coeficiente convectivo a partir del cual el número de Biot era mayor de 40. El número de Biot es el cociente entre la resistencia conductiva y la convectiva y normalmente se establece que cuando su valor es superior a 40 toda la resistencia a la transmisión de calor es conductiva asumiendo que la superficie exterior del alimento se encuentra a la misma temperatura que el medio de cocción y que por lo tanto la fluidodinámica del medio de cocción no va a influir en la transmisión de por convección al producirse ésta a una velocidad muy elevada.

4.3. Metodología para determinar los coeficientes convectivos a diferentes potencias.

Para el cálculo del coeficiente convectivo de transmisión de calor se realizó una experimentación con el objeto de obtener los valores experimentales de temperatura en el centro geométrico del alimento durante su por inmersión en agua hirviendo a presión atmosférica. El alimento escogido para este estudio fue la patata, concretamente en cubos de 4 cm de lado. Posteriormente se modeló el calentamiento del alimento durante su cocinado y las ecuaciones que rigen la transmisión de calor se resolvieron mediante un programa de fluidodinámica computacional. Por comparación de los perfiles térmicos teóricos y simulados se obtuvo el coeficiente convectivo como aquél que minimizaba las diferencias entre ambos.

4.3.1. Experimentación para determinar la evolución de la temperatura en el centro térmico del alimento.

El sistema experimental empleado para determinar los perfiles de tiempo-temperatura, se muestra en la Figura 1, y consta de los siguientes elementos:



Figura 1: Sistema experimental

Placa de inducción portátil: Marca dominó Bosch PIB375FB1E capaz de suministrar diferentes potencias según el nivel seleccionado según se muestra en la Tabla 1.

Sonda: Termopar tipo K de punción, conectado a un datalogger Testo 175/T4.

Vatímetro: Yokogawa modelo WT230.

Olla: Modelo Oumbärlig de IKEA, diámetro interno 22.3 cm, altura 15 cm de acero inoxidable/aluminio.

Alimento hervido: Patatas de la variedad UNIVERSA cortadas en cubos de 4 cm de lado.

Medio de cocción: 4L de agua del grifo.

La metodología utilizada para la determinación de la evolución de la temperatura en el centro térmico de la patata fue la siguiente: Se lleva el agua a ebullición utilizando la opción de máxima potencia. Cuando se alcanza el hervor se introduce la patata con la sonda de temperatura localizada en su posición central, con la que se registrarán los datos cada 5 s, y se ajusta la potencia al valor deseado: 2010 W (nivel 9) o 753 W (nivel 6.5); que corresponden respectivamente a una ebullición muy vigorosa y a la mínima para que se desarrolle el hervor. El experimento finaliza cuando la temperatura permanece constante y próxima a 100 °C. Las determinaciones se realizaron por triplicado

Tabla 1: Potencias suministradas por el inductor para diferentes puntos de consigna

Inductor	Consigna	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
F18B	Potencia (W)	62	94	126	156	218	250	312	376	438	500

Inductor	Consigna	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	"Booster"
F18B	Potencia (W)	594	718	876	1062	1282	1594	2000	3700

4.3.2. Modelado matemático de la transmisión de calor durante la cocción.

El modelo planteado para la transmisión de calor en el alimento, dada su naturaleza sólida, considera un mecanismo conductivo puro, gobernado por la ecuación de Fourier, que para un sistema tridimensional y coordenadas rectangulares se puede expresar como:

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

Donde $T(x, y, z, t)$ es la temperatura del alimento ($^{\circ}\text{C}$), en las correspondientes coordenadas cartesianas para un determinado tiempo, $t(\text{s})$ y $\alpha (\text{m}^2\text{s}^{-1})$ es la difusividad térmica del alimento, que depende de la conductividad, $k (\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1})$, densidad, $\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$ y calor específico, $C_p (\text{Jkg}^{-1}\text{k}^{-1})$. La expresión que relaciona la difusividad térmica con estos parámetros es:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2)$$

El sistema está sujeto a las siguientes condiciones:

-Inicialmente hay una temperatura homogénea en todos los puntos del alimento:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad \forall x, y, z \quad (3)$$

-Presenta simetría tridimensional, de forma que solamente se ha modelado un octante (un cubo de 2 cm de lado):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x/2} = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y/2} = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=z/2} = 0 \quad (4)$$

- En las caras externas del octante el mecanismo de transmisión de calor entre el agua de cocción y la superficie del alimento será convectivo, de forma que todo el calor que recibe la superficie del alimento por convección se transmite por conducción hacia el interior del mismo, pudiéndose expresar esa condición de contorno por la ecuación:

$$k \nabla T = h(T_e - T) \quad (5)$$

Donde: k ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) es la conductividad térmica del alimento; T_e ($^{\circ}\text{C}$), es la temperatura del medio de cocción, ∇T ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) es el gradiente de temperaturas; h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) el coeficiente convectivo de transmisión de calor; y X , Y , Z son los valores de las respectivas coordenadas, es decir, las dimensiones de los sistemas modelados:

$$X= 0,04 \text{ m}; Y= 0,04 \text{ m}; Z= 0,04 \text{ m}$$

El modelado matemático se ha implementado mediante un programa que permite realizar los cálculos de fluido dinámica computacional. Se trata del entorno de simulación COMSOL Multiphysics 3.4, concretamente el módulo de transmisión de calor. Se ha utilizado para conocer como varía la temperatura en el interior del alimento, puesto que durante la cocción la patata sufre un calentamiento en estado no estacionario, en el que hay que tener en cuenta la transmisión de calor por convección entre el agua y la superficie de la patata y conductiva en el interior de la patata.

Para simular la transmisión de calor a partir de las fórmulas y parámetros dados, el programa realiza un mallado del objeto, en este caso del cubo, como se aprecia en la Figura 2, de forma que utiliza los nodos para calcular el avance de temperatura en el centro térmico con el tiempo. Para calcular la temperatura en un punto o nodo de la malla, suma la temperatura en ese mismo punto en el tiempo infinitesimal mínimo anterior, más el incremento de temperatura en ese tiempo debido a transmisión de calor de los puntos de alrededor.

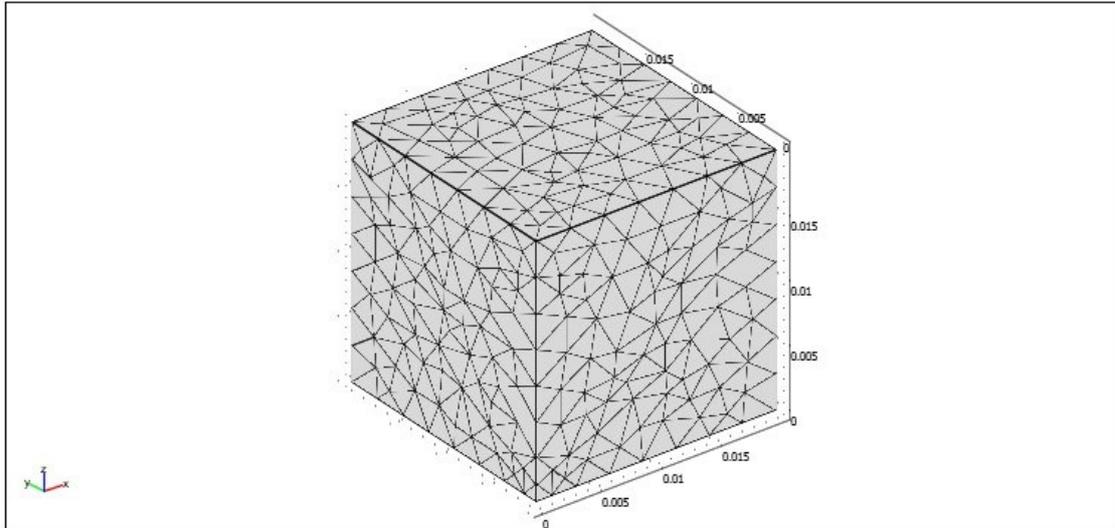


Figura 2: Mallado de patata en simulación con COMSOL

El programa nos proporciona los datos de tiempo-temperatura en una posición determinada. Para ello los parámetros de entrada son: T_0 , K , ρ , C_p y h . Con los datos obtenidos para el centro térmico del alimento, se realizó una comparación del modelado teórico con los datos experimentales, asignando a cada potencia los valores de h que más se ajustaran a la experimentación minimizando el sumatorio de los errores al cuadrado mediante la herramienta Solver de Excel.

4.4. Metodología experimental para la determinación de la evolución de la conductividad térmica del agua de cocción.

El sistema experimental utilizado es similar al descrito en el apartado 4.3 pero en este caso la placa de inducción estaba colocada sobre una balanza Kem (modelo: DS 30K0.1), con un intervalo de medida de 0 a 30 kg y una precisión de 0.1 g y permite el registro de datos cada 1s, lo que permite conocer la pérdida de peso en continuo. El alimento que se utilizó fueron patatas de la misma variedad pero cortadas en cubos de 3 cm de lado. En cada tanda se cocieron 5 cubos (unos 160 g) en 2L de agua del grifo.

Para cada una de las dos potencias (2000 W y 718 W) se determinó la evolución de la conductividad eléctrica del agua a 1, 3, 5, 7, 9, 11 y 13 min de cocción. Para ello, se extrajeron muestras de 40 mL a los tiempos seleccionados.

Para realizar una correcta determinación de la conductividad, hay que tener en cuenta que los solutos se concentran por el agua evaporada durante la cocción y hay que

contrarrestar este efecto. Para ello se diluye la muestra en una cantidad determinada teniendo en cuenta que se conoce la pérdida de agua por evaporación al registrarse el peso en continuo. Tras dejar las muestras a temperatura ambiente durante 2 h, se mide la conductividad eléctrica mediante un conductivímetro Crison, modelo GLP 32. La experimentación se realizó por triplicado.

En todos los casos se midió también la conductividad eléctrica del agua del grifo para analizar los datos como incremento con respecto a este valor de referencia.

5. Resultados y Discusión

5.1. Condiciones para las que no es despreciable la resistencia a la transmisión de calor por conducción

En primer lugar se quiso determinar en qué condiciones de cocción no es despreciable la resistencia a la transmisión de calor por convección para diferentes alimentos que de forma habitual se consumen hervidos; puesto que, de serlo, se podría considerar que la superficie del alimento tiene una temperatura igual a la del medio de cocción desde el primer instante y entonces la fluidodinámica del medio de cocción no va a influir en el calentamiento del alimento. Se trata de saber, por tanto, para cada alimento en qué circunstancias la potencia suministrada durante la cocción puede influir en la velocidad de calentamiento.

El primer paso para lograr este objetivo es conocer el valor de las propiedades térmicas implicadas en el transporte de calor para diferentes alimentos. Esta búsqueda se ha llevado a cabo en libros y artículos científicos y con los resultados obtenidos se ha elaborado una lista que se muestra en las Tablas 2, 3, 4 y 5, donde se detalla la densidad, el calor específico, la conductividad y la difusividad térmica de 22 alimentos junto con las referencias bibliográficas de donde se han obtenido dichos valores.

Tabla 2: Datos bibliográficos de calor específico de alimentos

Alimento	Cp (kJ/kg ⁻¹ K ⁻¹)		
	intervalo calculado mediante ecuación de Choi y Okos (1986)		datos obtenidos en la bibliografía
Acelga	4,033	4,076	
Alcachofa	3,734	3,803	3,48 (Hayes, G.D. (1987))
Apio	4,027	4,070	
Arroz	1,716	1,978	
Borraja	4,038	4,081	
Brócoli	3,923	3,972	3,85 (Hayes, G.D. (1987))/2,795-4,813 (Iribe Salazar et al. (2015))
Calabaza	3,884	3,935	
Cardo	4,022	4,067	
Cebolla	3,939	3,985	3,77 (Hayes, G.D. (1987))/3,81/4,01 (Abhayawick et al. (2002))
Col de bruselas	3,757	3,821	3,68 (Hayes, G.D. (1987))
Coliflor	3,982	4,030	
Espárago	3,975	4,018	
Espinaca	3,931	3,981	3,94 (Hayes, G.D. (1987))/3,9/3,805 (Toledo, R.T. (1994)).
Guisante	3,657	3,736	3,31/3,56 (Hayes, G.D. (1987))
Huevo	3,621	3,703	3,2/3,31 (Hayes, G.D. (1987))
Judía verde	3,919	3,973	3,94 (Hayes, G.D. (1987))
Pasta	1,819	2,071	
Patata	3,627	3,702	3,433 (Hayes, G.D. (1987))/3,515 (Vidaurre y Salas (2016))
Pepino	4,059	4,097	4,02 (Hayes, G.D. (1987)) /4,103 (Toledo, R.T. (1994)) /4.03 (Fasina y Fleming (2001))
Puerro	3,927	3,979	3,77 (Hayes, G.D. (1987))
Seta	3,942	3,990	3,942 (Hayes, G.D. (1987)) /3,935 (Shrivastava y Datta (1999))
Zanahoria	3,852	3,910	3,6 (Hayes, G.D. (1987)) /3,9/3,89 (Toledo, R.T. (1994)).

Tabla 3: Datos bibliográficos de conductividad térmica de alimentos

Alimento	k (Wm ⁻¹ K ⁻¹)		
	intervalo calculado mediante ecuación de Choi y Okos (1986)		datos obtenidos en la bibliografía
Acelga	0,578	0,659	
Alcachofa	0,533	0,612	
Apio	0,578	0,658	
Arroz	0,227	0,295	
Borraja	0,579	0,659	
Brócoli	0,562	0,641	0.326-0.731 (Iribe Salazar et al. (2015))
Calabaza	0,557	0,635	0,590 (Vidaurre y Salas (2016))
Cardo	0,577	0,657	
Cebolla	0,565	0,644	0.54 (Abhayawick et al. (2002))
Col de bruselas	0,537	0,614	
Coliflor	0,571	0,651	
Espárago	0,570	0,648	
Espinaca	0,563	0,641	
Guisante	0,520	0,598	0,32-0,502 (Hayes, G.D. (1987))
Huevo	0,504	0,573	0,33-0,97 (Hayes, G.D. (1987))
Judía verde	0,561	0,641	0,39-0,92 (Hayes, G.D. (1987))
Pasta	0,240	0,308	0,49 (Hayes, G.D. (1987))
Patata	0,518	0,595	0,55 (Hayes, G.D. (1987)) /0,554 (Vidaurre y Salas (2016))/0,529 - 0,652 (Božiková et al. (2017)) /0.533-0.571 (Rao et al. (1975)) / 0.56 (Rice et al. (1988)) / 0.577 (Carino, S. et al. (2013))
Pepino	0,583	0,663	0,62 (Fasina y Fleming (2001))
Puerro	0,563	0,642	
Seta	0,565	0,644	0,503-0,530 (Shrivastava y Datta (1999))
Zanahoria	0,552	0,631	0,62-0,67 (Hayes, G.D. (1987))/0.602-0.611(Božiková et al. (2017))

Tabla 4: Datos bibliográficos de densidad de alimentos

Alimento	ρ (kg m ⁻³)	
	intervalo calculado mediante ecuación de Choi y Okos (1986)	datos obtenidos en la bibliografía
Acelga	1013,03	971,71
Alcachofa	1049,56	1004,56
Apio	1015,00	973,72
Arroz	1373,48	1286,51
Borraja	1010,53	969,34
Brócoli	1026,16	983,78
Calabaza	1031,83	989,13
Cardo	1014,31	972,83
Cebolla	1034,44	992,03
Col de bruselas	1045,82	1001,32
Coliflor	1019,14	977,21
Espárgo	1019,63	978,02
Espinaca	1023,39	981,09
Guisante	1055,93	1009,67
Huevo	1016,35	972,03
Judía verde	1025,84	983,19
Pasta	1343,19	1259,55
Patata	1068,63	1022,26
Pepino	1011,67	970,82
Puerro	1025,86	983,34
Seta	1024,75	982,59
Zanahoria	1035,65	992,28

Tabla 5: Datos bibliográficos de difusividad térmica de alimentos

Alimento	α (m ² s ⁻¹)	
	intervalo calculado mediante ecuación de Choi y Okos (1986)	datos obtenidos en la bibliografía
Acelga	1,415x10 ⁻⁷	1,663x10 ⁻⁷
Alcachofa	1,361x10 ⁻⁷	1,601x10 ⁻⁷
Apio	1,414x10 ⁻⁷	1,661x10 ⁻⁷
Arroz	9,615x10 ⁻⁸	1,158x10 ⁻⁷
Borraja	1,418x10 ⁻⁷	1,665x10 ⁻⁷
Brócoli	1,396x10 ⁻⁷	1,639x10 ⁻⁷
Calabaza	1,389x10 ⁻⁷	1,631x10 ⁻⁷
Cardo	1,413x10 ⁻⁷	1,661x10 ⁻⁷
Cebolla	1,386x10 ⁻⁷	1,629x10 ⁻⁷
Col de bruselas	1,366x10 ⁻⁷	1,605x10 ⁻⁷
Coliflor	1,406x10 ⁻⁷	1,652x10 ⁻⁷
Espárgo	1,406x10 ⁻⁷	1,650x10 ⁻⁷
Espinaca	1,398x10 ⁻⁷	1,642x10 ⁻⁷
Guisante	1,348x10 ⁻⁷	1,586x10 ⁻⁷
Huevo	1,369x10 ⁻⁷	1,590x10 ⁻⁷
Judía verde	1,395x10 ⁻⁷	1,639x10 ⁻⁷
Pasta	9,832x10 ⁻⁷	1,179x10 ⁻⁷
Patata	1,336x10 ⁻⁷	1,572x10 ⁻⁷
Pepino	1,420x10 ⁻⁷	1,667x10 ⁻⁷
Puerro	1,396x10 ⁻⁷	1,641x10 ⁻⁷
Seta	1,399x10 ⁻⁷	1,643x10 ⁻⁷
Zanahoria	1,383x10 ⁻⁷	1,625x10 ⁻⁷

Los valores recogidos en la Tabla 2, 3, 4 y 5 proceden de libros que recopilan esta información como por ejemplo la obra de Hayes (1987) que elaboró una lista con las propiedades de todos los tipos de alimentos, en el libro “Manual de datos para ingeniería de los alimentos”. Otro caso a citar es el libro recopilatorio de propiedades térmicas titulado “Fundamentos de ingeniería de procesado de alimentos” de Toledo, R.T. (1994). Además, se han localizado numerosos estudios científicos que calculan propiedades térmicas de alimentos. Entre ellos, Shrivastava y Datta (1999) determinaron el calor específico y la conductividad térmica en distintos tipos de setas. En algunos casos se requieren estas propiedades para estudiar la influencia que tienen distintos factores en dichas propiedades, como por ejemplo el contenido en humedad. Abhayawick et al. (2002) determinaron las propiedades físicas de tres variedades de cebolla y estudiaron la influencia de su contenido en humedad.

Sin embargo, se aprecia que en la bibliografía hay muchos estudios centrados en algunos alimentos y lagunas en otros para los que prácticamente no hay datos disponibles. Así, la patata es, con diferencia, el alimento más empleado en este tipo de artículos. Božiková et al. (2017) realizaron una revisión de los parámetros térmicos básicos de alimentos seleccionados, entre ellos patata y zanahoria. Rao et al. (1975) aportan también datos de conductividad y difusividad térmica de dos variedades de patatas, al igual que Rice et al. (1988), que estudiaron el efecto de la temperatura en las propiedades térmicas de dicho alimento.

En algunos artículos se necesitaba determinar estas propiedades de los alimentos para llevar a cabo una experimentación relacionada con tratamientos térmicos. Sin embargo, en muchos casos el tratamiento no se trataba de una cocción sino de un escaldado, en el cual no se llega a la temperatura de ebullición. Así, Vidaurre y Salas (2016) estudiaron el modelo de transferencia de calor en el escaldado de patata y calabaza, usando un método finito diferencial. Fasina y Fleming (2001) cuantificaron las características de transferencia de calor de pepinos durante el escaldado. Iribe Salazar et al. (2015) estudiaron la transferencia de calor durante el escaldado y enfriamiento del brócoli.

A pesar de los numerosos libros y estudios que proporcionan datos termofísicos, hay muchos alimentos para los cuales no se han podido obtener datos, o bien se han

obtenido pocos, lo que da poco margen a la hora de estimar intervalos. Este es el ejemplo de los cardos, el apio o la coliflor.

Por este motivo y con el fin de completar la tabla de datos elaborada de propiedades de alimentos, se ha decidido utilizar las ecuaciones de Choi y Okos facilitadas en numerosos artículos y libros para determinar el calor específico, la conductividad térmica, la difusividad térmica y la densidad a diferentes temperaturas, a partir de la composición de cada alimento proporcionada por la base de datos del BEDCA. Las ecuaciones de Choi y Okos relacionan cada uno de estos parámetros con la composición, y a su vez con la temperatura. A partir de cada uno de sus componentes, calculando los parámetros por separado, se halla el total de esa propiedad para el alimento según las expresiones siguientes:

$$Cp = \sum_{i=1}^n CpX_i \quad (6)$$

$$k = \sum_{i=1}^n k_iX_i \quad (7)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_iX_i \quad (8)$$

$$\rho = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{\rho_i}} \quad (9)$$

Donde X_i es la fracción de cada componente considerado (humedad, grasa, proteína, carbohidratos, fibra, ceniza). Para cada una de estas propiedades térmicas, Choi y Okos asignan una fórmula que resuelve los valores de cada componente del alimento en función de la temperatura, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Ecuaciones de propiedades térmicas para diferentes componentes de los alimentos (Adaptado de Choi y Okos (1986))

Thermal Property	Food Component	Thermal Property Model
Thermal Conductivity, W/(m·K)	Protein	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}t - 2.7178 \times 10^{-6}t^2$
	Fat	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-3}t - 1.7749 \times 10^{-7}t^2$
	Carbohydrate	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}t - 4.3312 \times 10^{-6}t^2$
	Fiber	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}t - 3.1683 \times 10^{-6}t^2$
	Ash	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}t - 2.9069 \times 10^{-6}t^2$
Thermal Diffusivity, m ² /s	Protein	$\alpha = 6.8714 \times 10^{-8} + 4.7578 \times 10^{-10}t - 1.4646 \times 10^{-12}t^2$
	Fat	$\alpha = 9.8777 \times 10^{-8} - 1.2569 \times 10^{-10}t - 3.8286 \times 10^{-14}t^2$
	Carbohydrate	$\alpha = 8.0842 \times 10^{-8} + 5.3052 \times 10^{-10}t - 2.3218 \times 10^{-12}t^2$
	Fiber	$\alpha = 7.3976 \times 10^{-8} + 5.1902 \times 10^{-10}t - 2.2202 \times 10^{-12}t^2$
	Ash	$\alpha = 1.2461 \times 10^{-7} + 3.7321 \times 10^{-10}t - 1.2244 \times 10^{-12}t^2$
Density, kg/m ³	Protein	$\rho = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}t$
	Fat	$\rho = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}t$
	Carbohydrate	$\rho = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}t$
	Fiber	$\rho = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}t$
	Ash	$\rho = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}t$
Specific Heat, J/(kg·K)	Protein	$c_p = 2.0082 \times 10^3 + 1.2089t - 1.3129 \times 10^{-3}t^2$
	Fat	$c_p = 1.9842 \times 10^3 + 1.4733t - 4.8008 \times 10^{-3}t^2$
	Carbohydrate	$c_p = 1.5488 \times 10^3 + 1.9625t - 5.9399 \times 10^{-3}t^2$
	Fiber	$c_p = 1.8459 \times 10^3 + 1.8306t - 4.6509 \times 10^{-3}t^2$
	Ash	$c_p = 1.0926 \times 10^3 + 1.8896t - 3.6817 \times 10^{-3}t^2$

El segundo paso para determinar las condiciones en las que no es despreciable la resistencia a la transmisión de calor por convección es calcular en qué casos el número de Biot es menor de 40, según la siguiente ecuación:

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (10)$$

Para ello, se ha determinado el valor del coeficiente convectivo con el que se alcanza esta condición. Con ese objetivo, se ha utilizado una hoja Excel en la que se ha introducido como datos las propiedades térmicas recogidas en las Tablas 2 y 3, y las dimensiones más habituales de los diferentes alimentos cuando se cocinan hervidos, aproximando su forma a una determinada geometría. Por ejemplo, la zanahoria entera corresponde con un cilindro de 12,5 cm de largo y 2 cm de diámetro, y la borraja corresponde con un cuerpo rectangular de 5 x 1 x 0,3 cm (ver anexos). Se aprecia una gran influencia del tamaño del producto en el valor límite del coeficiente convectivo, siendo un límite mucho mayor para alimentos de pequeño tamaño. Los valores así obtenidos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Valores límite de los coeficientes convectivos para que no sea despreciable la resistencia conductiva a la transmisión de calor.

Alimento	Intervalo κ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Forma geométrica	Dimensiones(m)	h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) para $Bi < 40$
Acelga	0,578-0,659	Cuerpo rectangular	0,05 x 0,03 x 0,002	<462-526
Alcachofas	0,533-0,612	Esfera	0,05	<852-979
Apio	0,578-0,658	Cuerpo rectangular	0,14 x 0,025 x 0,004	<165-187
Arroz	0,227-0,295	Esfera	0,002	<9078-11798
Borrajias	0,579-0,659	Cuerpo rectangular	0,05 x 0,01 x 0,003	<463-527
Brócoli	0,326-0,731	Esfera	0,035	<745-1670
Calabaza	0,557-0,635	Cuerpo rectangular	0,02 x 0,06 x 0,035	<371-437
Cardos	0,557-0,657	Cuerpo rectangular	0,04 x 0,015 x 0,003	<556-566
Cebolla	0,540-0,644	Esfera	0,07	<617-735
		Cilindro	0,07 x 0,025	<616-735
Coles de bruselas	0,537-0,614	Esfera	0,03	<1431-1637
Coliflor	0,571-0,651	Esfera	0,035	<1305-1487
Espárrago	0,570-0,648	Cilindro	0,015 x 0,15	<151-172
Espinaca	0,563-0,641	Cuerpo rectangular	0,07 x 0,04 x 0,002	<321-366
Guisantes	0,320-0,598	Esfera	0,008	<3199-5978
Huevo	0,330-0,970	Esfera	0,04	<659-1939
Judías verdes	0,390-0,920	Cuerpo rectangular	0,013 x 0,03 x 0,003	<519-1226
Pasta	0,240-0,490	Cilindro	0,2 x 0,002	<47-97
		Cilindro	0,02 x 0,002	<479-978
		Cuerpo rectangular	0,013 x 0,03 x 0,003	<319-653
Patata	0,420-0,652	Cuerpo rectangular	0,035 x 0,02 x 0,008	<479-745
		Esfera	0,06	<559-869
Pepino	0,583-0,663	Cilindro	0,025 x 0,03	<776-882
Puerros	0,563-0,642	Cilindro	0,02 x 0,15	<149-170
Setas	0,503-0,644	Esfera	0,03	<1341-1770
Zanahoria	0,552-0,670	Cilindro	0,125 x 0,02	<176- 214
		Cilindro	0,08 x 0,02	<334-275

5.2. Coeficientes convectivos para diferentes regímenes de ebullición

Las ecuaciones que permiten el cálculo de la velocidad de calentamiento durante la cocción de cubos de patata, ecuaciones (1) a (5) se resolvieron con el programa COMSOL, utilizando los siguientes valores de los parámetros implicados:

Temperatura inicial de la patata, $T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$

Densidad de la patata, $\rho=1068,6\text{ kg m}^{-3}$

Conductividad térmica de la patata, $k=0,530\text{-}0,652\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Calor específico de la patata, $C_p=3,515\text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

Coficiente convectivo de transmisión de calor, $h=100\text{-}1000\text{ Wm}^{-2}\text{K}$

Como resultado, el programa permite tener información sobre la distribución de temperaturas en el alimento. En las Figuras 3 a 5 se muestra a modo de ejemplo la temperatura en el octante de la patata modelado a los 10, 60 y 600 s de cocción, respectivamente (para $k=0,652\text{ W/m }^\circ\text{C}$, y $h=500\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$). Como puede observarse a

los 10 s los vértices externos de la patata han alcanzado temperaturas en torno a los 95°C, mientras que el resto de la superficie externa presenta valores en torno a los 85 °C, una delgada capa de patata (<2 mm) tiene temperaturas superiores a 50 °C y el resto de la patata se mantiene a la temperatura inicial. Transcurridos 60 s, el centro térmico del alimento todavía se encuentra a 20 °C, pero ahora el grosor de la zona con temperaturas mayores s 50 °C ya ha alcanzado 1 cm. La forma de las líneas isoterms se mantiene a partir de los 60 s, cambiando lógicamente los valores de la temperatura, así a los 600 s el centro de la patata está a aproximadamente a 67 °C.

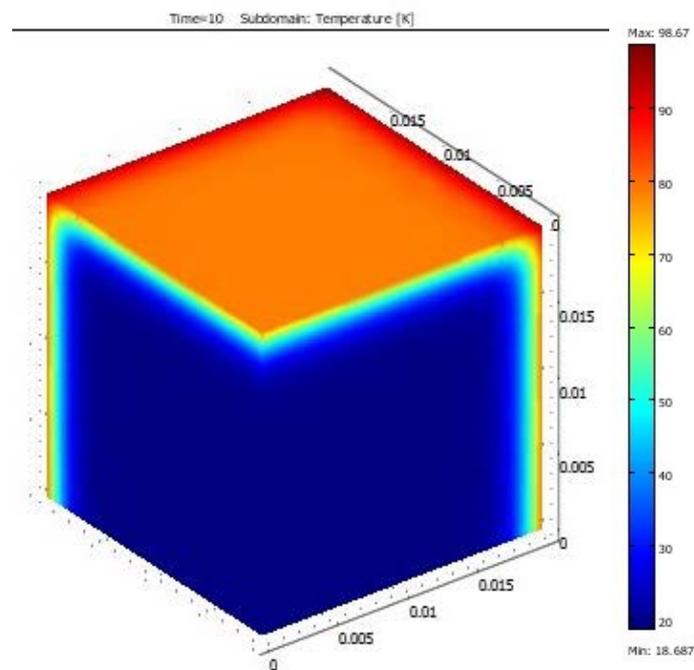


Figura 3: Distribución de temperaturas en un octante del cubo de patata a los 10 s de inmersión en agua hirviendo.

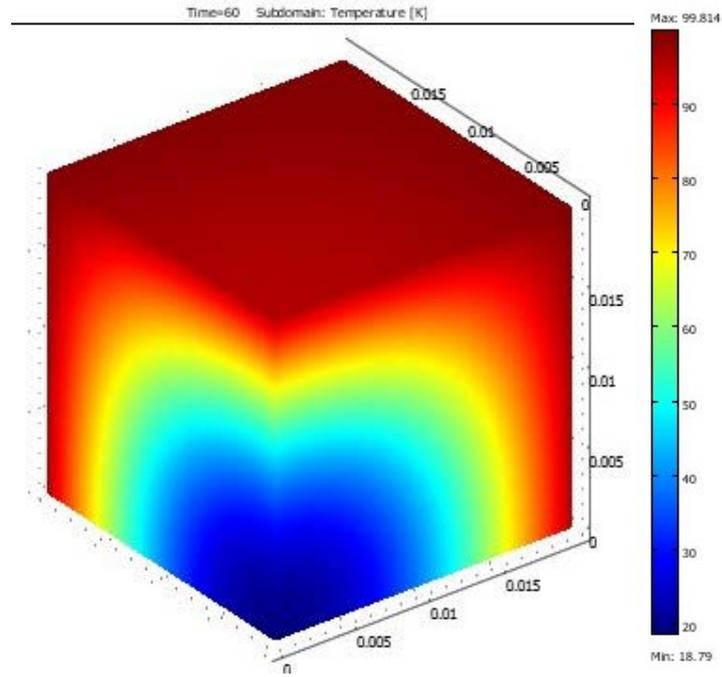


Figura 4: Distribución de temperaturas en un octante del cubo de patata a los 60 s de inmersión en agua hirviendo.

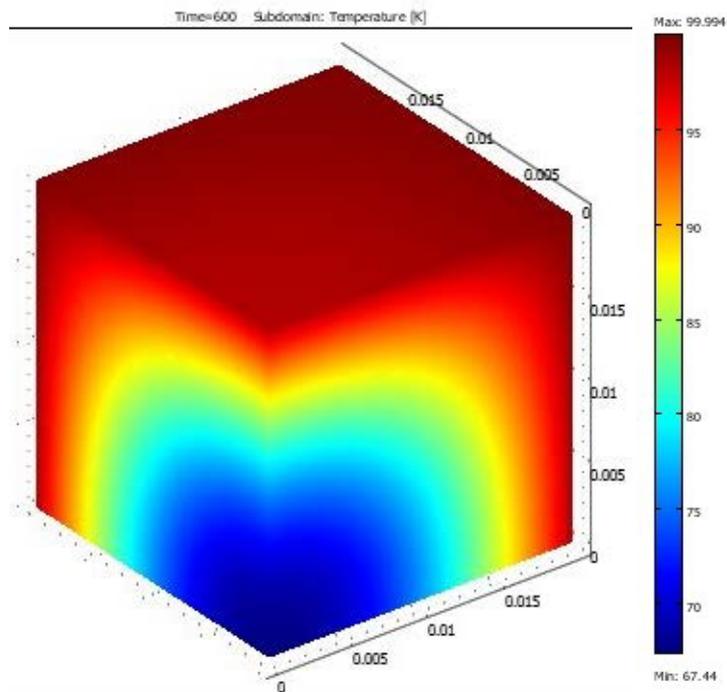


Figura 5: Distribución de temperaturas en un octante del cubo de patata a los 600 s de inmersión en agua hirviendo

Para analizar la influencia de la conductividad térmica y del coeficiente convectivo en la temperatura en el centro térmico de la patata. Se ha realizado un estudio paramétrico en el que se ha fijado una variable y variando la otra. Los resultados que reflejan la influencia del coeficiente convectivo se muestran en la Figuras 6 y de la conductividad térmica en la Figura 7.

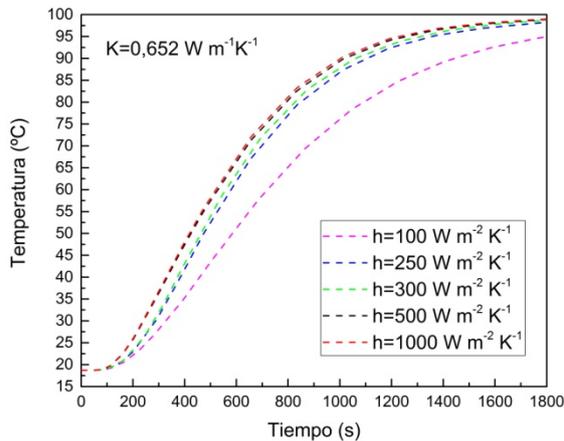


Figura 6: Estudio paramétrico variable h

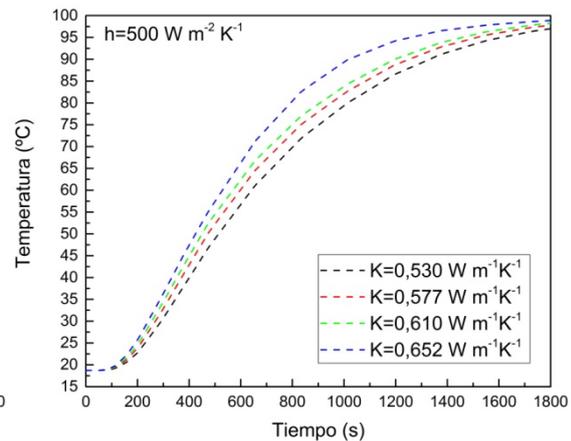


Figura 7: Estudio paramétrico variable k

Los valores de k utilizados forman parte del intervalo de valores obtenido para la patata tras la búsqueda bibliográfica (Tablas 2, 3, 4 y 5) se encuentra entre $0,530$ y $0,652 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Como se puede observar la conductividad térmica es un parámetro que tiene una gran influencia en la evolución térmica del centro del alimento. Consultando los pares de datos obtenidos, se aprecia que para incrementos de $0,04 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ existen diferencias notables en las curvas tiempo-temperatura, llegando a diferencias máximas de $10,6^\circ\text{C}$ entre la mayor y la menor conductividad para un mismo tiempo. Además, se ha encontrado que la conductividad térmica que mejor se ajusta a la curva obtenida experimentalmente tiene un valor de $0,652 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Por otro lado, se ha observado un patrón distinto en cuanto a la influencia de h en la temperatura central. Se ha tomado un intervalo amplio de valores, abarcando desde 100 hasta $1000 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Como puede observarse en la Figura 6, la influencia de la h en la curva tiempo-temperatura es alta, pero las diferencias se encuentran principalmente en el intervalo desde 100 hasta $250 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Para $h > 250 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$, las diferencias son mucho menores, llegando a ser la máxima diferencia entre ellas únicamente $6,3^\circ\text{C}$ para el mismo tiempo. Se ha obtenido como resultado que para una potencia suministrada de 2010 W el coeficiente convectivo que minimiza los errores con respecto a la curva obtenida experimentalmente es de $500 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$, siendo este valor de $250 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ para

la potencia de 753 W (Figura 8). Por lo tanto, teniendo en cuenta estos valores de h para los dos regímenes de ebullición, se puede concluir que todos los alimentos que presenten un valor límite para que la resistencia convectiva no sea despreciable, por encima de $500 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$, son productos en los que su velocidad de calentamiento dependerá del régimen de ebullición y por lo tanto de la potencia suministrada durante la cocción. Estos productos han sido señalados en la Tabla 7 con color azul.

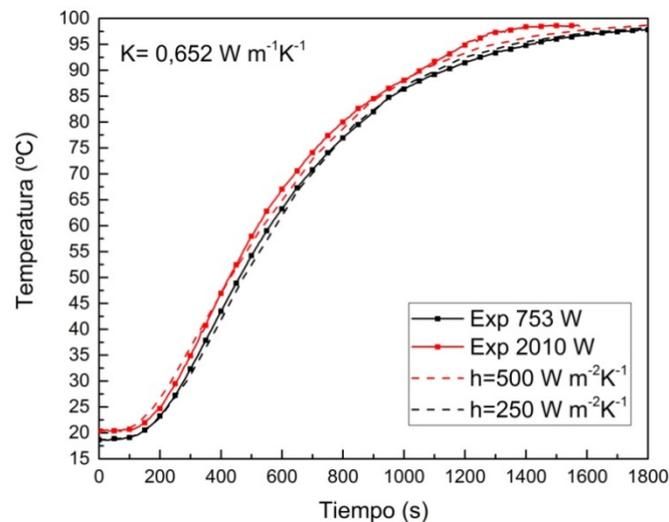


Figura 8: Estudio paramétrico variable h

5.3. Influencia de la potencia suministrada durante la cocción en la lixiviación de compuestos del alimento al agua de cocción.

Por último, se ha pretendido estudiar experimentalmente la influencia del régimen de ebullición en la transferencia de materia al medio de cocción. Las pérdidas de nutrientes no sólo son debidas a la degradación térmica por altas temperaturas y largos tiempos de cocinado, sino también por lixiviación en formas de cocinado donde el alimento está en contacto directo con el agua de cocción. Para evaluar las pérdidas por lixiviación se ha medido la evolución de la conductividad eléctrica del agua durante la cocción de cubos de patatas. Para contrarrestar el efecto que sobre la conductividad tiene la concentración de compuestos por las pérdidas por evaporación del agua durante la cocción se han realizado una serie de diluciones en el volumen de muestra inicial (40 mL) teniendo en cuenta los datos registrados de pérdida de peso por la balanza según se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8: Diluciones y medidas de conductividad eléctrica

	Tiempo (s)	Peso agua evaporada (g)	% pérdida de agua	Adición de agua (ml)	Volumen total (ml)	Conductividad (μS/cm)
Alta	0					640
	60	57,5	2,9	1,2	41,2	759
	180	210,2	10,5	4,2	44,2	807
	300	348,7	17,4	7,0	47,0	846
	420	484,6	24,2	9,7	49,7	900
	540	620,6	31,0	12,4	52,4	930
	660	775,1	38,8	15,5	55,5	987
	780	918,3	45,9	18,4	58,4	1043
Baja	0					640
	60	35,5	1,8	0,7	40,7	747
	180	113,1	5,7	2,3	42,3	788
	300	190,3	9,5	3,8	43,8	819
	420	271,6	13,6	5,4	45,4	844
	540	357,8	17,9	7,2	47,2	867
	660	433,5	21,7	8,7	48,7	884
	780	508,3	25,4	10,2	50,2	906

En la Figura 9 se muestran los incrementos en la conductividad eléctrica del agua de cocción, tomando como referencia el valor inicial del agua del grifo. Se aprecian diferencias significativas entre los valores obtenidos cuando la potencia suministrada es de 2010 W y cuando es 753 W, pudiéndose concluir que el régimen de ebullición afecta a la transferencia de materia durante la cocción.

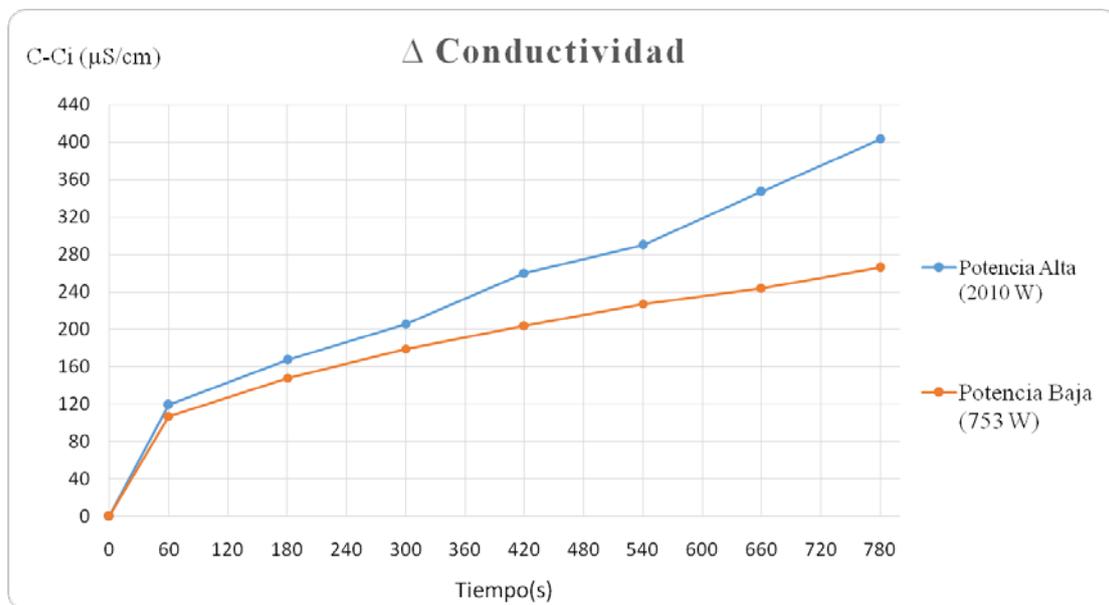


Figura 9: Influencia de la potencia en la conductividad eléctrica

Muchos estudios se han centrado en evaluar el efecto de diferentes métodos de cocinado (hervir, cocer al vapor, cocer a presión, cocinar en microondas, hornear, freír, cocinar al vacío, saltear...) en la calidad nutricional y propiedades organolépticas de los vegetales (Fallen & Fialho, 2009; Jiménez-Monreal, García-Diz, Martínez-Tomé, Mariscal, & Murcia, 2009; Juárez et al., 2017; Zhong, Dolan, & Almenar, 2015). Algunos de estos estudios han demostrado que la cocción puede mejorar la disponibilidad de algunos componentes bioactivos (Martínez-Hernández, Artés-Hernández, Gómez, & Artés, 2013; Ramos dos Reis et al., 2015), lo que puede atribuirse a una alteración de la pared de la membrana celular por el procesado térmico que favorece la accesibilidad para la extracción de los compuestos bioactivos (Jiménez-Monreal et al., 2009). Cuando se comparan diferentes métodos de cocción, la cocción por inmersión en agua hirviendo suele ser uno de los métodos con el que los vegetales retienen menos nutrientes, debido fundamentalmente a que la combinación temperatura/tiempo requerida produce su degradación térmica y a la lixiviación de compuestos en el agua de cocción (Fabbri & Crosby, 2016).

Los resultados obtenidos en este estudio parecen indicar que efectivamente existe una mayor cantidad de lixiviados cuando la turbulencia del medio de cocción es mayor, lo cual ocurre cuando se hierve a altas potencias, por lo tanto ese factor debería ser tenido en consideración a la hora de establecer las condiciones de cocción más respetuosas con el valor nutricional del alimento.

6. Conclusiones

La conclusión más importante de este trabajo es que se cumple la hipótesis de partida de que la potencia calefactora suministrada durante la cocción por inmersión en agua hirviendo afecta a la velocidad de transmisión de calor por convección. Los valores de los coeficientes convectivos de transmisión de calor, h , obtenidos a partir de los datos experimentales de evolución de temperatura en el centro térmico del alimento junto con un modelado matemático son: 250 y 500 $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ para las potencias suministradas de 753 y 2010 W, respectivamente.

Por otro lado, a partir de los datos de la Tabla 7 se puede concluir que hay muchos alimentos para los que no es despreciable la resistencia convectiva ($Bi < 40$) a la transmisión de calor hasta valores muy altos del coeficiente convectivo. Esto implica

que en la mayoría de los casos el calentamiento sí se ve influido por el régimen de ebullición, ya que en muchos casos ese valor límite del coeficiente convectivo está por encima de $500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

A pesar de que la potencia calefactora aplicada durante la cocción afecta a la transmisión de calor en los alimentos, la repercusión que esto tiene en los perfiles térmicos no es muy alta como se concluye del estudio paramétrico realizado. En la mayoría de los alimentos la diferencia máxima en la temperatura central para las comprendidas entre 250 y $1000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ es aproximadamente de $6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Como consecuencia de la conclusión anterior, el aplicar una potencia calefactora alta no supone que se pueda reducir sustancialmente el tiempo de cocción. Por ejemplo, para alcanzar la temperatura de gelificación ($\approx 67 \text{ }^\circ\text{C}$) en el centro térmico de una patata en forma de cubo de 3 cm , se tardan 609 s con un coeficiente convectivo de $500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (2010 W); mientras que el tiempo para alcanzar esa misma temperatura son 650 s , con un coeficiente convectivo de $250 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (753 W). Desde el punto de vista energético, el mayor consumo que supone la cocción a altas potencias no se compensa en absoluto por la reducción del tiempo de cocinado (en el ejemplo la cocción a altas potencias supone 204 Wh más de consumo que a bajas potencias).

Por otro lado, se ha podido comprobar que el régimen de ebullición afecta significativamente a la transferencia de materia, incrementando la incorporación de sustancias al agua de cocción por lixiviación al aumentar la potencia calefactora. Por lo tanto, desde el punto de vista de reducir la pérdida de nutrientes, se recomienda hervir los alimentos a la menor potencia calefactora posible.

Conclusions

The most important conclusion of this academic work is that the starting hypothesis is fulfilled, because the heating power supplied during cooking by immersion in boiling water affects the convection heat transfer speed. The values of the convective coefficients of heat transmission, h , obtained from the experimental data of temperature evolution in the thermal center of the food together with a mathematical modeling are: 250 and $500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ for the powers supplied of 753 and 2010 W , respectively.

On the other hand, from the data in Table 7 it can be concluded that there are many foods for which the convective resistance ($Bi < 40$) is not negligible to the heat transfer

up to very high values of the convective coefficient. This implies that in most cases the heating is influenced by the boiling regime, since in many cases that limit value of the convective coefficient is above $500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Although the heating power applied during cooking affects the heat transmission in food, the repercussion on the thermal profiles is not very high as it is concluded from the parametric study carried out. In most foods the maximum difference in core temperature for h between 250 and $1000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ is approximately 6°C .

As a consequence of the above conclusion, applying a high heating power does not mean that the cooking time can be substantially reduced. For example, to reach the gelation temperature ($\approx 67^\circ \text{C}$) in the thermal center of a 3 cm cube shaped potato, it takes 609 s with a convective coefficient of $500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (2010 W); while the time to reach that same temperature is 650 s, with a convective coefficient of $250 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (753 W). From an energy point of view, the higher consumption involved in cooking at high power is not compensated at all by the reduction of cooking time (in the example the cooking at high power supposes 204 Wh more of consumption than at low power).

On the other hand, it has been found that the boiling rate significantly affects the transfer of matter, increasing the incorporation of substances into the cooking water by leaching with increasing heating power. Therefore, from the point of view of reducing losses of nutrients, it is recommended to boil the food at the lowest possible heating power.

7. Valoración personal

Considero que durante la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado he adquirido los conocimientos, capacidades y aptitudes previstas en el plan de estudios de este grado. Cursar esta asignatura me ha proporcionado la oportunidad de profundizar e interiorizar con ejemplos prácticos numerosos apartados relacionados con varias de las asignaturas cursadas como son Matemáticas, Física, Fundamentos de ingeniería química, Operaciones básicas en la industria alimentaria, Cocinado industrial y restauración colectiva, y Tecnología de productos vegetales.

Realizar este trabajo me ha servido, más específicamente, para profundizar en los fenómenos de transporte de calor e incluso de materia que tienen lugar durante un proceso culinario. Me ha permitido, por otro lado, abarcar un ámbito distinto como la

simulación teórica de procesos y la comparación con la experimentación real, lo que implica aprender a aplicar los conocimientos teóricos al desarrollo práctico con fines concretos. También ha sido importante el aprendizaje en cuanto a interpretar resultados, discutiendo y averiguando las causas de los posibles fallos en la experimentación, para posteriormente encontrar y aplicar las soluciones pertinentes.

Una vez obtenidos los resultados, uno de los retos a superar ha sido, además de obtener conclusiones, plasmarlo en el trabajo de forma visual, clara y ordenada, utilizando una correcta escritura y un lenguaje formal, pero sin abusar de tecnicismos, de forma que resulte entendible para el lector a pesar de no estar especializado en conceptos relacionados con la ingeniería de alimentos. Además me ha servido para aprender a ajustarme a unas indicaciones previamente exigidas, en este caso para la elaboración del trabajo.

Por otra parte he adquirido soltura y competencia en el manejo de tablas, gráficas y programas de cálculo y escritura en general, necesarios hoy en día en emprender numerosas labores, entre ellas, en el plano científico. Otro aporte ha sido el aprendizaje del manejo y entendimiento de instrumentos específicos como una sonda, vatímetro y conductivímetro.

En cuanto a la búsqueda bibliográfica, me ha ayudado a reforzar mis habilidades de búsqueda y de análisis de información correcta y veraz sobre un tema concreto, así como a desenvolverme en búsquedas bibliográficas en inglés. Esto implica saber también reconocer y respetar los derechos de autor, aprendiendo a mencionar correctamente toda la información obtenida tanto en libros como en artículos.

Desde un punto de vista más personal, elaborar este trabajo me ha exigido implementar hábitos relacionados con la organización y disciplina, debido a la extensión y tiempo que demanda un trabajo de fin de grado. Sumado a esto, he avanzado a la hora de desenvolverme socialmente y comunicarme, tanto con mi profesora tutor del TFG, expresando mis dudas y entendiendo sus aportaciones y enseñanzas, como con las personas presentes en el laboratorio a las cuales he tenido que solicitar ayuda en momentos concretos.

8. Bibliografía

Abhayawick, L., Laguerre, J.C., Tauzin, V., Duquenoyb, A. (2002). “Physical properties of three onion varieties as affected by the moisture content“. *Journal of Food Engineering*, 55(3), pp. 253-262. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00099-7

Beck, J.V. (1963). “Calculation of thermal diffusivity from temperature measurements“. *Journal of Heat Transfer*, 85(2), pp. 181-182. DOI: 10.1115/1.3686050

BEDCA. Base de datos Española de composición de alimentos (2018). Disponible en: <http://www.bedca.net/> [Consultado 10-04-2018]

Božiková, M., Híreš, L., Valach, M., Malínek, M., Mareček, J. (2017). “Basic thermal parameters of selected foods and food raw materials“. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(2), pp. 391–400. DOI: 10.11118/actaun201765020391

Cariño Sarabia, J.F., Vélez Ruiz J.F. (2013). “Evaluation of convective heat transfer coefficient between fluids and particles in suspension as food model systems for natural convection using two methodologies“. *Journal of Food*, 115(2), pp. 173-181. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2012.10.010

Cernuschi, F., Bison, P.G., Figari, A., Merinetti, S., Grinzato, E. (2004). “Thermal diffusivity measurements by photothermal and thermographic techniques“. *International Journal of Thermophysics*, 25(2), pp. 439-457. DOI:10.1023/B:IJOT.0000028480.27206.cb

Choi, Y., Okos, M.R. (1986). Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. *Journal of Food Process and Applications*, 1(1), pp. 93-101.

Clarke, P., Evans, S.H. (2016). “How do cooks actually cook vegetables? A field experiment with low-income households“. *Health Promotion Practice*, 17(1), pp. 80-87. DOI:10.1177/1524839915597898

Denys, S., Pieters, J.G., Dewettinck, K. (2003). "Combined CFD and experimental approach for determination of the surface heat transfer coefficient during thermal processing of eggs". *Journal of Food Science*, 68(3), pp. 943-951.

Erdogdu, F. (2007). "A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient". *Journal of Food Engineering*, 83(3), pp. 453-459. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.10.019

Fabbri, A., Crosby, G. (2016) "A review of the impact of preparation and cooking on the nutritional quality of vegetables and legumes". *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 3, pp. 2–11. DOI:10.1016/j.ijgfs.2015.11.001

Faller, A. L., Fialho, E. (2009). "Polyphenol availability in fruits and vegetables consumed in Brazil". *Revista de Saúde Pública*, 43(2), 211-218. DOI: 10.1590/S0034- 89102009005000010

Farinu, A., Baik, O.D. (2007) "Thermal properties of sweet potato with its moisture content and temperature". *International Journal of Food Properties*, 10(4), pp. 703-719. DOI: 10.1080/10942910601137482

Fasina, O.O., Fleming, H.P. (2001). "Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching". *Journal Of Food Engineering* 47(3), pp.203-211. DOI: doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00117-5

Feyissa, A.H., Christensen, M.G., Pedersen, S.J., Hickman, M., Adler Nissen, J. (2015). "Studying fluid-to-particle heat transfer coefficients in vessel cooking processes using potatoes as measuring devices". *Journal of Food Engineering*, 163, pp. 71-78. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.04.022

Hayes, G.D. (1987). *Manual de datos para ingeniería de los alimentos*. London: LongmanGroup, UK.

Iribe Salazar, R., Caro Corrales, J., Hernández Calderón, O., Zazueta Niebla, J., Gutiérrez Dorado, R, Carrasco-Escalante, M., Vázquez-López, Y. (2015). "Heat transfer during blanching and hydrocooling of broccoli florets". *Journal of Food Science*, 80(12), pp. 2774-81. DOI: 10.1111/1750-3841.13109

Jiménez Monreal, A.M., García Diz, L., Martínez Tomé, M., Mariscal, M., Murcia, M.A. (2009). "Influence of cooking methods on antioxidant activity of vegetables". *Journal of Food Science*, 74(3), pp. 97-103. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2009.01091.x

Juániz, I., Ludwig, I.A., Bresciani, L., Dall'Asta, M., Mena, P., Del Rio, D., De la Peña, M.P. (2017) "Bioaccessibility of (poly)phenolic compounds of raw and cooked cardoon (*Cynara cardunculus* L.) after simulated gastrointestinal digestion and fermentation by human colonic microbiota". *Journal of Functional Foods*, 32, 614195–207. DOI: 10.1016/j.jff.2017.02.033

Lewis, M.J. (1993). *Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado*. England: Ellis Horwood Ltd., Chichester.

Martínez-Hernández, G.B., Artés-Hernández F., Gómez P.A., Artés F. (2013). "Comparative behavior between kailan-hybrid and conventional fresh-cut broccoli throughout shelf life". *Food Science and Technology*, 50, pp. 298-305. DOI:10.1016/j.lwt.2012.05.010

Mir, J., Oria, R., Salvador, M.L. (2008). "Control parameters for sous-vide cook-chill processing of borage (*Borago Officinalis*) stems". *Acta Horticulturae*, 802, pp. 177-182. DOI:10.17660/ActaHortic.2008.802.21

Mukarami, E.G. (1997). "The thermal properties of potatoes and carrots as affected by thermal processing". *Journal of Food Process Engineering*, 20(5), pp. 415-432. DOI:10.1111/j.1745-4530.1997.tb00431.x

Nesvadba, P. (1982). "Methods for the measurement of thermal conductivity and diffusivity of foodstuffs". *Journal Of Food Engineering*, 1(2), pp. 93-113. DOI:10.1016/0260-8774(82)90003-6

Phinney, D.M., Frelka J.C., Heldman D.R. (2016). "Composition-Based Prediction of Temperature-Dependent Thermophysical Food Properties: Reevaluating Component Groups and Prediction Models". *Journal of Food Science*, 82(1), pp. 6-15.

Ramesh, M.N., Satharayana, K. (1997). "Surface heat transfer coefficient in steam cooking of vegetables". *Journal of Food Science and Technology*, 34(2), pp. 87-91. Disponible en: <http://ir.cftri.com/7818/>.

Ramos-Dos Reis, C.L., Oliveira, V., Hagen, M., Jablonski, Oliveira-Rios, A. (2015). "Effect of cooking on the concentration of bioactive compounds in broccoli (*Brassica oleracea* var. Avenger) and cauliflower (*Brassica oleracea* var. Alphina F1) grown in an

organic system". Food chemistry, 172, pp. 770-777. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.09.124

Rao, M., Barnard, J., Kenny, J.F. (1975). "Thermal conductivity and thermal diffusivity of process variety squash and white potatoes." Transactions of the ASAE, 18, pp. 1188-1192. DOI:10.13031/2013.36767

Rice, P., Selman, J.D., Abdul Rezak, R.K. (1988). "Effect of temperature on thermal properties of "record potatoes". International Journal of Food Science & Technology 23(3), pp. 281-286. DOI:10.1111/j.1365-2621.1988.tb00580.x

Shrivastava, M. y Datta, A.K. (1999). "Determination of specific heat and thermal conductivity of mushrooms (*Pleurotus florida*)". Journal of Food Engineering, 39(3), pp. 255-260. DOI:10.1016/S0260-8774(98)00145-9

Singh, R.P. (1992). "Heating and Cooling Processes for Foods". En: Heldman, D.R. y Lund, D.B. Handbook of food engineering. New York: Marcel Dekker, Inc, pp. 247-276.

Sweat, V.E. (1994). "Thermal Properties of Foods". En: Rao, M.A. y Rizvi, S.S.H. Engineering properties of foods. New York: Marcel Dekker, Inc, pp. 99-138.

Toledo, R.T. (1994). Fundamentals of food process engineering. (2^a ed.) New York: Chapman & Hall.

Vidaurre Ruiz, J.M., y Salas Valerio, W.F. (2016) "Modeling heat transfer during blanching of cubic particles of loche (*Cucurbitamoschataduch*) and potato (*Solanum Tuberosum* L.) using finite difference method". Journal of Food Process Engineering, 40(3), pp. 1745-1753. DOI:10.1111/jfpe.12451

Woodfield, P.L., Monde, M., Mitsutake Y. (2007). "On estimating thermal diffusivity using analytical inverse solution for unsteady one-dimensional heat conduction". International Journal of Heat and Mass Transfer, 50(5), pp. 1202-1205. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.031

Zhong, X, Dolan, KD & Almenar, E. (2015). "Effect of steamable bag microwaving versus traditional cooking methods on nutritional preservation and physical properties

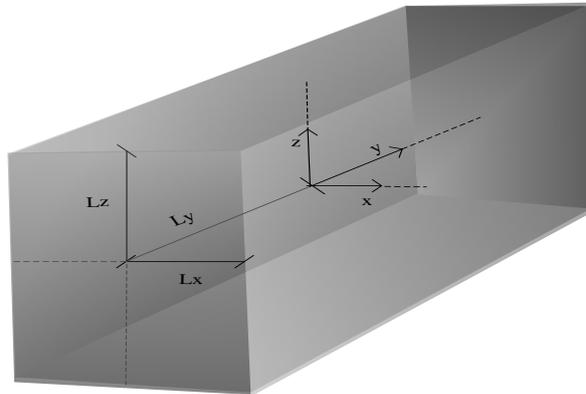
of frozen vegetables: A case study on broccoli (*Brassica oleracea*)”. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 31, pp. 116-122. DOI:10.1016/j.ifset.2015.07.002

9. Anexos

3-D Rectangular body

$$0.1 < Bi < 40$$

Uniform initial temperature, convection at the surface



Input Data

Dimensions of the slab

Half thickness in x direction, $L_x = 0,0005$ m

Half thickness in y direction, $L_y = 0,05$ m

Half thickness in z direction, $L_z = 0,03$ m

Coordinates of the point xyz

Distance along x-axis, $x = 0$ m

Distance along y-axis, $y = 0$ m

Distance along z-axis, $z = 0$ m

Initial and boundary conditions

Initial temperature, $T_0 = 20$ °C

Temperature of the environment, $T_e = 100$ °C

Physical properties

Density, $\text{den} = 1013,03$ kg/m³

Heat capacity, $c_p = 4033$ J/kgK

Thermal conductivity, $k = 0,578$ W/mK

Thermal diffusivity, $T_d = 1,56E-07$ m²/s

Heat transfer coefficient, $h = 463$ W/m²°C

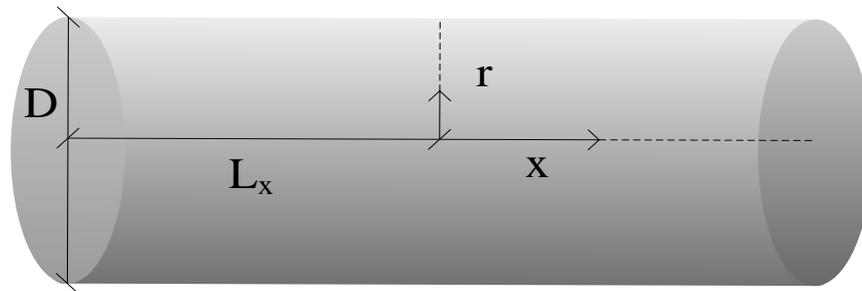
	Bi_x	Bi_y	Bi_z
Biot number	0,40	40,05	24,03

Anexo I: Hoja de cálculo para obtener el límite de h para $Bi < 40$, cuerpo rectangular (ejemplo con datos de borraja).

Cylinder

$0.1 < Bi < 40$

Uniform initial temperature, convection at the surface



Input Data

Dimensions of the cylinder

Diameter,	D=	0,02 m
Half the height of the cylinder,	L _x =	0,1250 m

Coordinates of the point rx

Distance along axis,	x=	0 m
Distance along radius,	r=	0 m

Initial and boundary conditions

Initial temperature,	T _o =	20 °C
Temperature of the environment,	T _e =	100 °C

Physical properties

Density,	den=	1100 kg/m ³
Heat capacity,	c _p =	456 J/kgK
Thermal conductivity,	k=	0,552 W/mK
Thermal diffusivity,	Td=	1,10E-06 m ² /s

Heat transfer coefficient	h=	176 W/m ² °C
---------------------------	----	-------------------------

	Bi_R	Bi_x
Biot number	3,2	39,9

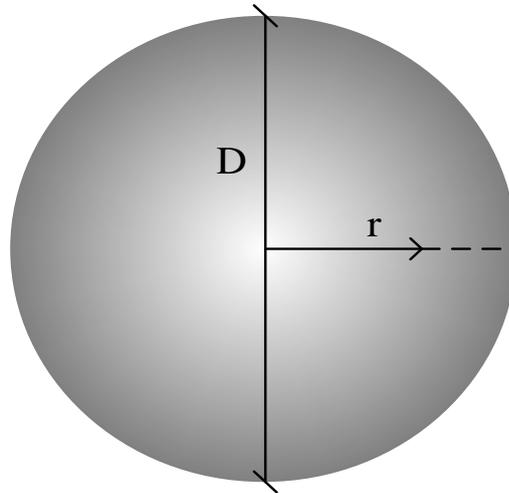
Anexo 2: Hoja de cálculo para obtener el límite de h para $Bi < 40$, forma cilíndrica (ejemplo con datos de zanahoria).

Sphere

$0.1 < Bi < 40$

Temperatura Uniforme Inicialmente

Convección en el exterior y conducción en el interior de la esfera



Datos de entrada

Dimensiones de la esfera

Diametro, $D = 0,008 \text{ m}$

Coordenadas del punto

Distance del centro de la esfera, $r = 0,000001 \text{ m}$

Condiciones Iniciales y de frontera

Temperatura inicial, $T_o = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura del entorno, $T_e = -35 \text{ }^\circ\text{C}$

Propiedades físicas

Densidad, $den = 1032 \text{ kg/m}^3$

Capacidad calorífica, $c_p = 3310 \text{ J/kgK}$

Conductividad térmica, $k = 0,32 \text{ W/mK}$

Difusividad térmica, $Td = 9,37E-08 \text{ m}^2/\text{s}$

Coeficiente convectivo $h = 3199 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$

Número de Biot $Bi = 39,99$

Anexo 3: Hoja de cálculo para obtener el límite de h para $Bi < 40$, forma esférica (ejemplo con datos de guisante).