



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL
MEDI NATURAL

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



ESTUDIO CINÉTICO DEL SECADO DE PECHUGA DE POLLO MEDIANTE FT-TIR

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

ALUMNO: VICENTE PASTOR TUDELA

TUTOR: Dr. Pedro José Fito Suñer

CO-TUTORES: Dra. Marta Castro Giráldez



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL
MEDI NATURAL

Nombres y apellidos:

Título de la tesina: ESTUDIO CINÉTICO DEL SECADO DE PECHUGA DE POLLO MEDIANTE FT-TIR

Lugar de realización: Instituto Universitario de Ingeniería de los Alimentos para el Desarrollo (IuIAD-UPV).

Titulación: MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

Tutor/a: Dr. Pedro José Fito Suñer.

Cotutor/a: Dra. Marta Castro Giráldez.

Fecha lectura: Septiembre 2017



Resumen

El consumo de carne de pollo se ha incrementado de manera importante en los últimos años. Éste aumento se debe a que es una de las carnes con menos porcentaje en grasa, lo que le confiere un carácter saludable. Es por este motivo que ha pasado a ser uno de los tipos de carne más comercializados en la actualidad. En el mercado se puede encontrar pollo en diversos formatos. Este caso se centra en pechuga de pollo deshidratada, el cual puede formar parte de múltiples productos, tanto de consumo humano (sopas de sobre, etc.), como de consumo animal (piensos para perros, etc.). Por tanto, con el objetivo de conservar los alimentos mediante el proceso de deshidratación, con una mínima pérdida tanto nutricional como organoléptica, se desarrolla la técnica de secado con aire caliente. Ésta consiste en un secador de aire caliente por resistencias eléctricas con control de la temperatura de secado, velocidad y humedad relativa. La aplicación de esta técnica sobre un producto cárnico permite conservarlo a temperatura ambiente sin peligro microbiológico, para facilitar así su transporte, almacenamiento y comercialización, y que al ser rehidratado, éste recupera su valor nutricional y organoléptico. En este trabajo se pretende modelizar, mediante modelos de termodinámica irreversible, el proceso de secado por aire caliente de pechuga de pollo. Para ello se realizó una operación de secado por aire caliente de pechuga de pollo registrando durante el proceso la masa de la muestra, la permitividad dieléctrica mediante un sensor de puntas conectado a un analizador de impedancias Agilent 4294A; además se utilizó una cámara termográfica OPTRIS PI 160 para poder obtener la evolución de temperaturas de la superficie de la muestra durante el proceso; por último, se registró la temperatura del ambiente, la temperatura de un material de referencia y la temperatura de la superficie de la muestra mediante sondas tipo k conectadas a equipo de adquisición de datos datalogger Agilent 34972, . Además se determinó la humedad, el volumen y la actividad de agua antes y después de la operación de secado. Los resultados han permitido obtener un modelo termodinámico que describe las fuerzas impulsoras del proceso de secado por aire caliente de pollo, así como predecir los fenómenos de expansión/contracción de la carne. Al mismo tiempo, se ha podido demostrar que la termografía infrarroja es una buena herramienta para controlar el proceso de secado de carne de pollo. Con esta técnica, es posible obtener de manera no invasiva la temperatura superficial de la muestra durante el tratamiento. Por último, se ha demostrado una relación directa entre la permitividad en la dispersión α con respecto al número de moléculas de agua. Así, podemos concluir que la permitividad es un método no destructivo y rápido para poder monitorizar la evolución del proceso de secado.

Palabras clave: carne de pollo, secado por aire caliente, control del proceso, infrarrojos



Abstract

The consume of chicken meat has increased importantly in the last few years. This increment has happened because chicken meat is considered the meat with less percentage of fat and people think of it as a healthier option. That's the reason why, nowadays, this kind of meat is one of the most commercialized. On the market you can find chicken in different formats. This case study will discuss about dehydrated chicken breast, that can be used in a huge variety of products, to be consumed by humans (dry soups, etc) and also by animals (animal feed, etc) Therefore, with the objective of maintain aliments with a dehydration process, and with the minimum nutritional and organoleptic loss, we will develop a technique using warm air. This technique consists of a heated air dryer by electric resistances with control of the drying temperature, speed and relative humidity. The application of this technique on a meat product will keep the room temperature without a microbiologic danger, and will make it easier to transport, storage and commercialization. And, when being rehydrated, it will recover its nutritional and organoleptic value. With this study case we are trying to model, through models of irreversible thermodynamics, the process of hot air drying of chicken breast. For that purpose we realized a hot air drying of chicken breast, recording, while the process, the mass of the sample, its relative permittivity using a point sensor connected to a impedance analyser (Agilent 4294S); Also we used a thermo graphic camera (OPTRIS PI 160) to get the evolution of the temperature on the Surface of the sample during the process; and last but not least, we registered the room temperature of the Surface of the sample using k type probes connected to a data acquisition system (Datalogger Agilnet 34972). Also, we determined the humidity, volume and water activity before and after the drying process. Results have allowed us to obtain a thermodynamic model that describes driving forces of the process of hot air drying of chicken breast, and furthermore, to predict the expansion/contraction phenomenal occurred on the meat. At the same time, we have been able to demonstrate that the infrared thermography is a great tool to control the drying process of the chicken meat. With this technique is possible to obtain, in a non invasive way, the superficial temperature of the sample while the treatment. Finally, we have proved the direct relation between permittivity on the dispersion of α with regard to the number of water molecules. So we can conclude that de permittivity is a non destructive and fast method to monitor the evolution of the drying process.

Keywords: Chicken meat, Hot air drying, process control, infrared.



INFORME TUTOR TRABAJO FIN DE GRADO

Informe del tutor (per a qualsevol de les modalitats del treball fin de grau/master)

TUTOR's REPORT (for any type of final degree thesis)

CURSO - Curs - Academic year 2016-2017

DATOS DEL ALUMNO/A - Dades de l'alumne/a - Student's identification

Máster: Ingeniería agronómica

Apellidos (Cognoms - Surname(s)): Pastor Tudela Nombre (Nom - Name): Vicente

DNI (ID card nr.): 07261682F Teléfono (Telèfon - Phone nr.): 676 989 420

Correo electr. (Correu electr. - email): vipastu@etsiamn.upv.es

TÍTULO DEL TRABAJO FIN DE GRADO - Títol del Treball Fi de Grau - Title of the Final Degree Thesis

ESTUDIO CINÉTICO DEL SECADO DE PECHUGA DE POLLO MEDIANTE FT-TPR

Tutor/a (Tutor): Dr. Pedro José Fito Suñer

Cotutor/a (Co-Tutor): Dra. Marta Castro Giráldez

FECHA (Data) Date: 28/07/2017

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	1
1.2. TEJIDO MUSCULAR	2
1.3. SECADO POR AIRE CALIENTE	2
1.4. ESPECTROFOTOMETRÍA	4
1.4.1. Radiofrecuencia	4
1.4.2. Infrarrojos	5
2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	7
2.1. OBJETIVOS	7
2.1.1. OBJETIVO GENERAL	7
2.1.2. OBJETIVOS PARTICULARES	7
2.2. PLAN DE TRABAJO	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1. MATERIA PRIMA Y MUESTREO	8
3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	8
3.3. OPERACIÓN DE SECADO POR AIRE CALIENTE	10
3.4. MEDIDAS FÍSICO-QUÍMICAS	11
3.4.1. Humedad	11
3.4.2. Actividad del agua (a_w)	11
3.4.3. Variación de masa	12
3.4.4. Volumen	12
3.4.5. Control de Temperatura	12
3.5. INFRARROJOS	12
3.6. RADIOFRECUENCIA	13
4. RESULTADOS	14
4.1. Modelo termodinámico del proceso de secado por aire caliente de pechuga de pollo	14
4.2. Análisis de la espectrofotometría de Radiofrecuencia	23
5. CONCLUSIONES	28
6. BIBLIOGRAFÍA	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Curva típica de secado de materiales húmedos. A. Período de Inducción, B. Período de Velocidad Constante, C. Período de velocidad decreciente (Adaptada de Fito et al., 2001).....	3
Figura 3.1. Pechuga de pollo (Pectoralis major).....	8
Figura 3.2. Descripción del montaje utilizado. 1: Báscula analítica; 2: Panel de control del secador; 3: analizador de impedancias Agilent; 4: Cámara termográfica; 5: Data logger con los termopares tipo K dentro del secador; 6: Pegatina de emisividad conocida; 7: Muestra colgada; 8: Muestra colgada con sensor de agujas para la medida de radiofrecuencia.....	9
Figura 3.3. Diagrama de flujo del plan experimental.....	10
Figura 4.1. Variación de masa total de las muestras de pollo durante el secado.....	14
Figura 4.2. Esquema de la interfase de la muestra de pollo durante el secado.....	15
Figura 4.3. Relación de la emisividad de la muestra con la energía emitida por la misma.....	18
Figura 4.4. Isoterma de sorción de pollo secado con aire caliente.....	19
Figura 4.5. Flujo de agua durante el tratamiento de secado.....	21
Figura 4.6. a) Relación entre el coeficiente fenomenológico sin considerar los términos mecánicos (L_w^*) y el flujo de agua durante todo el tratamiento de secado. b) Detalle de la relación entre el coeficiente fenomenológico sin considerar los términos mecánicos (L_w^*) y el flujo de agua a partir de los 15 minutos de secado hasta el final del tratamiento.....	22
Figura 4.7. Evolución de la energía mecánica, desarrollada a partir del modelo termodinámico propuesto, a lo largo de todo el tratamiento de secado.....	23
Figura 4.8. Espectro de la constante dieléctrica.....	24
Figura 4.9. Relación entre la constante dieléctrica en la dispersión α (40 Hz) y su relación con el número de moléculas de agua de la muestra durante el tratamiento de secado.....	25
Figura 4.10. Relación entre la constante dieléctrica en la dispersión β y su relación con el número de moléculas de agua de la muestra durante el tratamiento de secado....	26
Figura 4.11. Relación entre la constante dieléctrica en la dispersión β y la actividad de agua durante el proceso de secado.....	27

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

En la actualidad, debido a la elevada competitividad que sufren las empresas fruto de la globalización de los mercados, unido a la actual crisis económica, las empresas se ven obligadas a optimizar cada etapa del proceso de obtención de sus productos, con el objeto de obtener productos seguros y de calidad, con el mínimo coste de producción posible.

Especialmente, el sector de la carne es uno de los más importantes de la industria alimentaria europea, ya que constituye la principal fuente de proteínas de nuestra dieta. Dentro de los productos cárnicos, la pechuga de pollo, es uno de los más valorados en la actualidad, debido a su bajo precio y su bajo contenido graso comparado con carnes como la de vacuno o porcino (Traffano-Schiffo et al., 2017). Se estima que, en 2020, la producción mundial de pollo alcanzará los 122,5 millones de toneladas.

El secado es una etapa fundamental del procesado de productos que se emplea fundamentalmente con el objetivo de disminuir la actividad de agua del mismo y así alargar su vida útil. Es una operación costosa debido a los largos tiempos, controles requeridos y al elevado consumo de energía (Clemente et al., 2011). En este contexto, resulta de gran importancia aumentar el conocimiento sobre los puntos críticos de dicha operación.

Bibliográficamente se han encontrado diferentes modelos de transporte de agua en distintas estructuras alimentarias, tales como en el jamón salado (Gou et al., 2002; Clemente et al., 2011), pimiento rojo (Doymaz & Pala, 2002), tomate (Akanbi et al., 2006). Sin embargo, existen pocos datos sobre los cambios que produce el proceso de secado sobre los parámetros cinéticos y termodinámicos en la pechuga de pollo. Es por ello, que es importante realizar el desarrollo de un estudio cinético y termodinámico con el objeto de describir las propiedades físico-químicas y estructurales del transporte de agua en la pechuga de pollo durante la técnica de secado. Esta descripción termodinámica del proceso se puede acoplar a medidas no destructivas (termografía infrarroja, espectrofotometría) con el objeto de implementar técnicas que puedan monitorizar en línea el proceso de secado de carne de pollo y sus diferentes etapas.

Por lo tanto, la presente tesina de máster ha enfocado su estudio en la modelización termodinámica del proceso de secado de carne de pollo acoplado a distintas técnicas no destructivas y de fácil implementación en la línea de producción con la finalidad de monitorizar las distintas etapas del proceso de secado.

1.2. TEJIDO MUSCULAR

La carne está considerada uno de los sistemas biológicos más complejos que existen. Especialmente debido a su composición, donde sus células poseen una de las estructuras más altamente organizadas del cuerpo animal (Huff-Lonergan et al., 2010). Está compuesta por tejido muscular y conectivo. El músculo esquelético está formado por fascículos constituidos de fibras musculares, que son células filamentosas largas y sin ramificar, rodeadas por una membrana plasmática (sarcolema), situada debajo de una capa de tejido conectivo denominada endomisio (Ponce-Alquicira, 2006). Los fascículos musculares están unidos por el perimisio, es decir, el tejido conectivo. Por último, se encuentra el epimisio, que es la capa de tejido conectivo que recubre el conjunto de fascículos.

El principal componente del músculo es el agua que supone entre un 65-80% del peso. La mayor parte de este contenido de agua, un 85% aproximadamente, se localiza en el espacio intramiofibrilar y el otro 15% se encuentra en el exterior de la red miofibrilar (Pearce et al., 2011). Por tanto, teniendo en cuenta el elevado contenido de agua, se considera que la carne es un medio ideal para el crecimiento de microorganismos, por lo que se la considera un alimento altamente perecedero. Es por ello que es necesario realizar operaciones de conservación como la deshidratación, ya que la ausencia de agua no permite crecer ni multiplicarse a dichos microorganismos causantes del deterioro, y de este modo se aumenta la vida útil del producto (Traffano-Shiffo et al., 2013).

1.3. SECADO POR AIRE CALIENTE

El secado de alimentos es una de las principales operaciones unitarias para preservar alimentos en el tiempo. Dicho proceso es promovido por la diferencia de potencial químico cuando se expone el producto a un fluido (aire caliente) con un potencial químico menor, por tanto, el agua del interior del alimento migra hacia la superficie, donde se evapora y se transporta hacia el medio. Durante este proceso de

secado, se llevan a cabo cambios estructurales del sistema, además de producirse, de forma simultánea, transferencias de calor y de masa.

Tradicionalmente el secado consta de tres etapas (Figura 1.1): período de inducción, período de velocidad de secado constante y período de velocidad de secado decreciente. Durante la primera etapa, se acoplan distintos mecanismos de transporte de agua promovidos por la diferencia de potencial químico entre el alimento y el aire caliente, aumentando la temperatura de la superficie. En la segunda etapa, la velocidad de eliminación de agua de la superficie del producto es menor que la velocidad con la que llega desde el interior, es por ello que la superficie del alimento se mantiene en la temperatura húmeda. Es decir, todo el calor se emplea en evaporar el agua. El contenido de agua al finalizar esta segunda etapa se conoce como humedad crítica (X_{wc}). A medida que transcurre el tiempo, el producto se va secando hasta que la velocidad con la que el agua llega a la superficie es menor que la de evaporación, por lo tanto, el calor recibido se emplea en evaporar el agua así como en calentar el producto; esta etapa se denomina de velocidad de secado decreciente.

La curva típica de secado se puede observar en la Figura 1.1 (Fito et al., 2001).

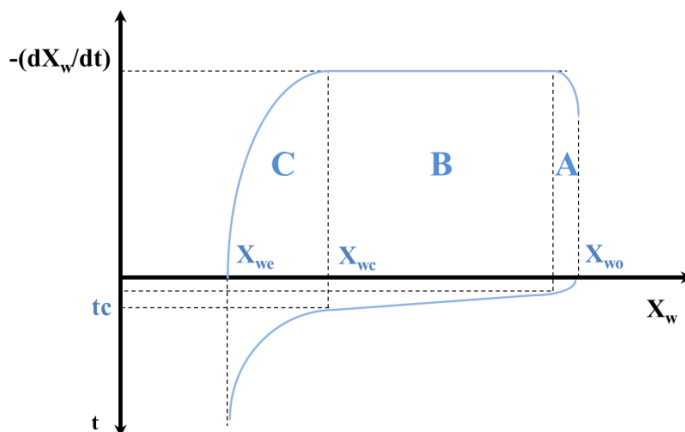


Figura 1.1. Curva típica de secado de materiales húmedos. A. Período de Inducción, B. Período de Velocidad Constante, C. Período de velocidad decreciente (Adaptada de Fito et al., 2001).

1.4. ESPECTROFOTOMETRÍA

La permitividad (ϵ^*) es la propiedad física que describe la interacción entre un flujo de fotones y el medio por el cual circulan dichos fotones. Al generar interacciones de baja energía la penetración que se produce es muy elevada, pudiéndose utilizar la permitividad para analizar tejidos complejos. Es decir, que mediante el análisis de las propiedades eléctricas de un flujo de fotones cuando éste atraviesa un sistema biológico, es posible determinar la cantidad y el estado de las especies químicas presentes que interaccionan con dicho flujo.

La permitividad vectorial (ϵ^*) se puede definir mediante la ecuación 1.

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

Dónde: ϵ' corresponde a la constante dieléctrica y ϵ'' al factor de pérdidas.

La constante dieléctrica (ϵ') representa la proporción de energía eléctrica que es almacenada al orientarse el medio respecto a la dirección del campo, y el factor de pérdidas (ϵ'') representa el desplazamiento del campo inducido por las transformaciones de energía eléctrica en otras energías. A bajas frecuencias, la interacción entre el medio y el campo genera un aumento en la movilidad molecular, desencadenando entre otros fenómenos colisiones y fricción entre moléculas, disipando la energía eléctrica en forma de energía mecánica y calorífica.

1.4.1. Radiofrecuencia

La permitividad relativa del material biológico presenta diferentes dispersiones o interacciones dependiendo del rango de frecuencia de los fotones que circulan. Dentro de las dispersiones de orientación e inducción, en el rango de la radiofrecuencia se pueden distinguir las dispersiones α y β .

La dispersión $-\alpha$, se produce en el rango desde los Hz hasta unos pocos kHz y representa la orientación de las cargas móviles dentro del sistema biológico (Kuang & Nelson, 1997).

La dispersión $-\beta$, se produce en el rango desde unos pocos kHz hasta MHz. Describe las interacciones con cargas fijas o de movilidad baja que se encuentran en

el sistema biológico. Esta dispersión se divide en dos partes, las interacciones dentro del rango de kHz, que engloban las interacciones con cargas pertenecientes a macromoléculas estructurales que conforman, a su vez, la fase sólida del sistema, es decir, cargas fijas, como pueden ser las proteínas, y una segunda parte, de mayor energía (MHz), donde se encuentran las interacciones de cargas asociadas a la tensión superficial o polarizaciones interfaciales de las superficies sólidas que se encuentran en contacto con el medio fluido, dicho fenómeno se conoce como efecto Maxwell Wagner.

1.4.2. Infrarrojos

La termografía infrarroja es una técnica que proporciona información sobre cómo se produce la transferencia de calor en los tejidos de la carne (Workmaster et al., 1999). Dicha tecnología consiste en la medida de la radiación infrarroja emitida por una superficie corporal y de este modo obtener una imagen de su distribución térmica. Algunas de las de las principales ventajas que presenta esta metodología, es que se trata de un procedimiento no destructivo, sin contacto directo con el alimento, y que proporciona un mapa térmico de todo el cuerpo. Esto supone una importante ventaja respecto a otros tipos de sensores que solamente proporcionan información sobre un punto concreto.

En el espectro de infrarrojos, es decir, dentro del rango de 1 a 400 THz, las interacciones del flujo de fotones se producen con el electrón del orbital, el cual acumula la mayor parte de la energía del átomo, es por esto, que debido a cualquier excitación, de dicho electrón, aumenta la energía interna del átomo. La posterior relajación a toda excitación, genera la emisión de un fotón equivalente a la energía del electrón de valencia emisor. Por tanto, es posible desarrollar sistemas que reciban éstas emisiones y estimar la energía interna del cuerpo (Traffano-Schiffo, 2017).

Sin embargo, no toda la energía medida proviene del cuerpo que se está midiendo, debido a interferencias causadas por fenómenos de reflexión del cuerpo. Por este motivo hay que corregir la energía medida con el parámetro denominado emisividad (ϵ), que consiste en la relación entre la energía emitida por el cuerpo y la emitida si no existieran fenómenos de reflexión. La cantidad de energía fotónica medida depende de la temperatura del cuerpo y su emisividad.

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2)$$

Donde: E=flujo de energía recibido por la cámara de infrarrojos (Wm^{-2});
 ε =emisividad del cuerpo (-); σ = constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^2 \text{ K}^{-4}$);
T=temperatura (K).

Por tanto, la termografía infrarroja ofrece la posibilidad de monitorizar el proceso de secado de carne de pollo, ya que se puede obtener la distribución de temperaturas en la superficie de la muestra de manera no destructiva y sin contacto a lo largo de todo el proceso (Vadivambal y Jayas, 2011).

2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

2.1. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo de investigación es el desarrollo de un modelo termodinámico del proceso de secado de carne de pollo mediante la termografía infrarroja, utilizando además la espectroscopia dieléctrica como sistema de monitorización.

2.2. PLAN DE TRABAJO

1. Revisión bibliográfica relacionada con el producto a desarrollar, sobre la termografía infrarroja y sobre la espectrofotometría.
2. Puesta a punto de las distintas metodologías a utilizar.
3. Preparación de las muestras. Caracterización de la materia prima.
4. Puesta en marcha del proceso de secado y de las metodologías de infrarrojos y espectrofotometría de radiofrecuencia..
5. Realización de los análisis físico-químicos de las muestras tratadas.
5. Tratamiento de datos e interpretación de resultados.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIA PRIMA Y MUESTREO

Para el trabajo experimental se utilizaron muestras de pollo (*Pectoralis major*) (Figura 3.1). Mediante la ayuda de un sacabocados se obtuvieron cilindros de 2 cm de diámetro y 1 cm de altura. El corte de los cilindros por parte del sacabocados se efectuó en perpendicular a las fibras.



Figura 3.1. Pechuga de pollo (*Pectoralis major*)

3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En primer lugar, las pechugas de pollo frescas (*Pectoralis major*) fueron seleccionadas de modo que representaran una muestra estándar, sin demasiadas estrías, es decir, de calidad media/alta.

Se obtuvieron 5 cilindros, de 2 cm de diámetro y 1 cm de altura, para cada tratamiento de secado. Tres de ellos se utilizaron para la determinación de la humedad inicial de la carne; a los otros dos se les determinó la actividad de agua, la masa, el volumen, la permitividad y, posteriormente se introdujeron en el secador.

Las dos muestras introducidas en el secador se colocaron de forma que una de ellas quedara colgando en el centro de la sección del secador, conectada a una báscula que registre de forma continua la variación de masa. Y la otra muestra en la

parte lateral sobre una rejilla a 1 cm de la base del secador. La posición de las muestras fue de tal manera que la cara plana del cilindro quedara en perpendicular al flujo de aire.

Se colocó la cámara de infrarrojos de forma que enfocaba la cara plana de los dos cilindros de carne, además de un material de referencia de emisividad conocida (Figura 3.2). Este material de referencia se utilizó para posteriormente ajustar el error de la medición del espectro infrarrojo y poder observar las variaciones de temperatura en la sección de la muestra durante toda la operación de secado.

Al mismo tiempo, se colocó el sensor de agujas a la muestra lateral para medir la permitividad mediante espectrofotometría de radiofrecuencia en continuo.

Antes de comenzar la operación, se colocaron tres termopares de tipo K para registrar la temperatura en continuo en el centro de la cámara de secado, en la superficie de la muestra situada en el lateral, y en el material de referencia de emisividad conocida.

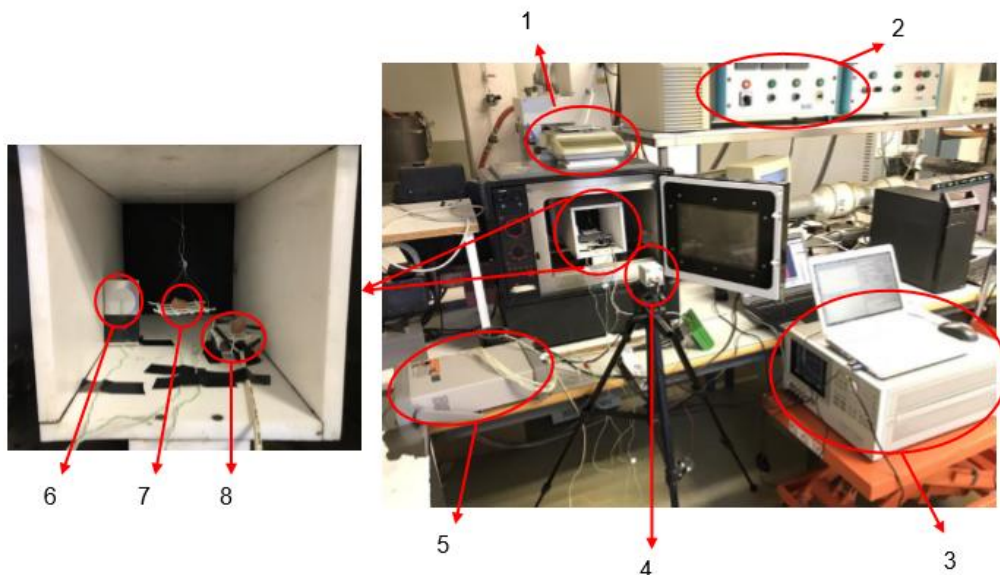


Figura 3.2. Descripción del montaje utilizado. 1: Báscula analítica; 2: Panel de control del secador; 3: analizador de impedancias Agilent; 4: Cámara termográfica; 5: Data logger con los termopares tipo K dentro del secador; 6: Pegatina de emisividad conocida; 7: Muestra colgada; 8: Muestra colgada con sensor de agujas para la medida de radiofrecuencia.

Una vez alcanzado este punto, se procedió a realizar la operación de secado, durante un periodo de 67 horas, a una temperatura de 40 °C y una velocidad del aire de 1,5 m/s.

Finalmente, con el objetivo de caracterizar las muestras, se realizaron distintas determinaciones al terminar la operación de secado: masa, actividad de agua, volumen y permitividad.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo del plan experimental llevado a cabo:

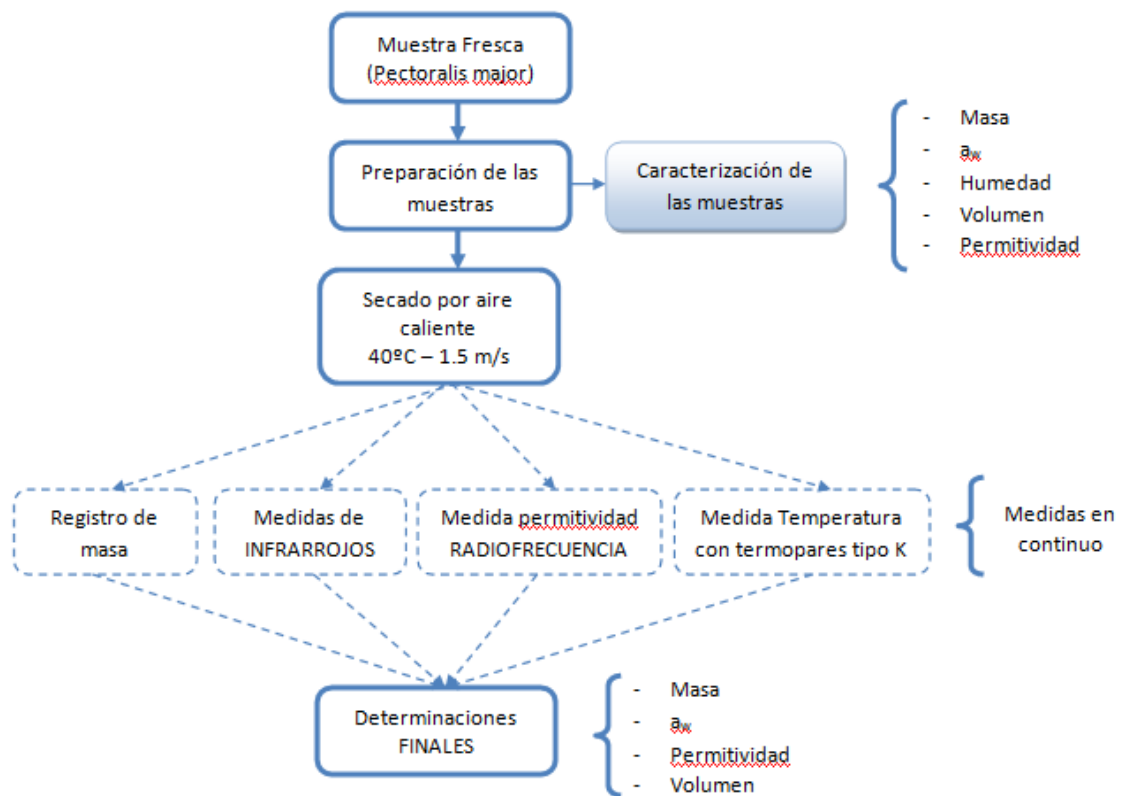


Figura 3.3. Diagrama de flujo del plan experimental.

3.3. OPERACIÓN DE SECADO POR AIRE CALIENTE

La operación de secado por aire caliente se llevo a cabo en las siguientes condiciones operativas: velocidad del aire de 1,5 m/s, medido y controlado mediante

un anemómetro digital TESTO 425 (precisión de $\pm 0,03$ m/s), una temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un tiempo total de secado de 67 h.

3.4. MEDIDAS FISICO-QUÍMICAS

3.4.1. Humedad

Se prepararon pesasustancias. Posteriormente, se introdujeron en la estufa a $110 \pm 2^{\circ}\text{C}$ donde se dejaron secar durante 2 h. Después de llevarlos a temperatura ambiente en un desecador, se pesaron en una balanza analítica y se añadió aproximadamente 1,2 g de muestra. Después se volvió a pesar todo. Las pesasustancias con la muestra se dejaron en la estufa a $110 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 h. Después, se dejaron enfriar en el desecador y se volvieron a pesar.

La humedad expresada en g de agua/100 g de muestra se calculó con la ecuación 3.1.

$$\% \text{ humedad} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_0)} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

m_0 = masa del pesasustancias (g).

m_1 = masa del pesasustancias con la muestra antes de la desecación (g).

m_2 = masa del pesasustancias con muestra después de la desecación (g).

3.4.2. Actividad del agua (a_w)

Para las medidas de actividad del agua (a_w), un higrómetro de punto de rocío Decagón de la marca Aqualab®, modelo serie 3 TE a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0,003$ (Decagon Devices, Inc., Washington, E.E.U.U.). Las medidas de a_w fueron obtenidas sin llevar a cabo una desestructuración previa de las muestras analizadas, es por ello, que los resultados obtenidos corresponden a la actividad de agua superficial.

3.4.3. Variación de masa

Para la determinación de masa se utilizó balanza analítica Mettler Toledo® AB304-S con una precisión de $\pm 0,001$ g.

3.4.4. Volumen

El volumen de las muestras se midió con un pie de rey, con las medias de los diámetros y alturas de cada muestra.

3.4.5. Control de Temperatura

El control de las temperaturas durante el proceso de secado del material de referencia de emisividad conocida, la muestra y el ambiente de la cámara, se realizó con tres termopares tipo K, todos ellos conectados al multiplexor de Agilent 34901A (Agilent Technologies, Malasia); para el registro automático de esas medidas se usó el equipo de adquisición de datos de Agilent 34972A (Agilent Technologies, Malasia), conectado a un ordenador con los software Agilent Connection Expert y Agilent BenchLink Data Logger 3 (Agilent Technologies, Malasia).

3.5. INFRARROJOS

Se instaló una cámara de infrarrojos Optris PI® 160 (Optris GmbH, Berlín, Alemania) frente a la muestra, de tal forma de monitorizar todo el proceso de secado. Dicha cámara trabaja a longitudes de onda comprendidas entre $780 \mu\text{m}$ y $14 \mu\text{m}$ y utiliza un plano focal bidimensional con 160×120 píxeles, en un rango espectral de $7,5$ a $13 \mu\text{m}$, con una resolución de $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ y una precisión de $\pm 2\%$. La misma viene acompañada de un software Optris PI Connect (Optris GmbH, Berlín, Alemania) para el análisis de los resultados. Un material de referencia con emisividad conocida ($\epsilon = 0,95$ - Optris GmbH, Berlín, Alemania) fue colocado al lado de la muestra en estudio a fin de corregir la emisividad de la muestra. Las temperaturas de la muestra lateral, del material de referencia con emisividad conocida y del ambiente del secadero fueron monitorizadas mediante termocuplas tipo-k conectadas a un multiplexor Agilent

34901A (Agilent Technologies, Malasia) y registradas por sistema adquisición de datos Agilent 34972A (Agilent Technologies, Malasia).

3.6. RADIOFRECUENCIA

El sensor utilizado fue desarrollado por el Laboratorio de Propiedades Dieléctricas (Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo IuIAD) y el Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (I3M) ambos pertenecientes a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Valencia, España. El mismo consiste en dos electrodos de aguja situados a ambos lados de la muestra en la cara cilíndrica (Figura 3.2). El sensor se conecta a un analizador de impedancias Agilent 4294A. El rango de frecuencia de medida es de 40 Hz a 1 MHz y la calibración se realiza en abierto y corto.

4. RESULTADOS

4.1 Modelo termodinámico del proceso de secado por aire caliente de pechuga de pollo

La variación de masa de las muestras durante el proceso de secado se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$\Delta M = \frac{M^t - M^0}{M^0} \quad (4.1)$$

Donde M representa la masa de la muestra (kg) y el superíndice t representa el tiempo del proceso, siendo 0 el tiempo inicial. La curva de variación de masa se puede observar en la figura 4.1. Como es un proceso de secado, la variación de masa total de la muestra durante el proceso se debe a la pérdida de agua.

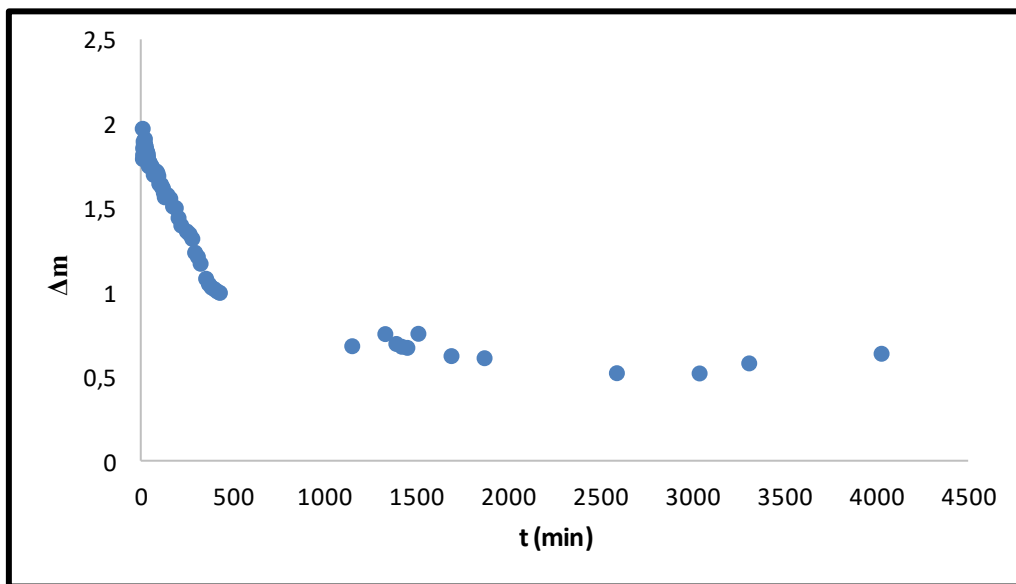


Figura 4.1. Variación de masa total de las muestras de pollo durante el secado.

El proceso de secado envuelve fenómenos estructurales complejos que difícilmente se explican con modelos tradicionales. El uso de la termodinámica irreversible permite tener en cuenta la estructura en el transporte de agua durante el secado. La variación de la energía libre de Gibbs se puede analizar mediante la siguiente ecuación (Castro-Giráldez et al., 2010):

$$dG = -SdT + VdP + Fdl + \psi de + \sum_i \mu_i dn_i \quad (4.2)$$

Donde: SdT corresponde con el término entrópico y está relacionado con los flujos de calor; VdP corresponde con el término de energías mecánicas relacionadas con la variación de presión; Fdl corresponde con el término de energías mecánicas relacionadas con la fuerza de elongación; ψde corresponde con el término de energías relacionadas con el campo eléctrico inducido por los iones disueltos; $\sum_i \mu_i dn_i$ corresponde con el término de actividades y es el sumatorio del potencial químico de la especie "i", siendo constantes el resto de las variables de estado.

Para poder analizar termodinámicamente el proceso, es necesario definir una interfase para poder analizar el gradiente de energía a través de esa interfase (Figura 4.2).

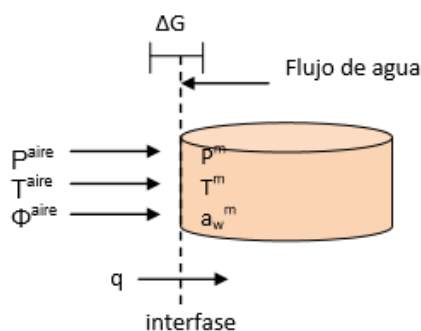


Figura 4.2. Esquema de la interfase de la muestra de pollo durante el secado.

Si se considera la variación de energía libre por mol de agua, es posible definir el potencial químico extendido del agua de acuerdo con la ecuación 4.3.

$$\Delta\mu_w = \frac{\Delta G}{\Delta n_w} \quad (4.3)$$

Donde: $\Delta\mu_w$ = potencial químico del agua ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$); ΔG = variación de la energía libre de Gibbs (J); Δn_w = moles de agua (mol).

A partir de las ecuaciones 4.2 y 4.3 se puede obtener la ecuación 4.4. Los términos F_{dl} y ψ_{de} de la ecuación 4.2 se pueden despreciar ya que el tejido muscular es un sistema elástico y además no existe un gran efecto de los iones debido a que la muestra solo tenía iones nativos de la carne, respectivamente.

$$\Delta\mu_w = -s_w (T^{aire} - T^m) + v_w (P^{aire} - P^m) + RT^m \ln \frac{a_w^m}{\phi^{aire}} \quad (4.4)$$

Donde: s_w = entropía molar parcial del agua ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$); T = temperatura (K); v_w = volumen parcial molar de agua ($m^3 \cdot mol^{-1}$); P = presión (atm); R = constante de los gases ideales ($8.314472 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$); a_w = actividad de agua; ϕ = humedad relativa. Los superíndices m y $aire$ se refieren a la muestra y al aire que rodea a la misma, respectivamente.

Con el objetivo de obtener el potencial químico del agua es necesario desarrollar la entropía molar parcial del agua (Ecuación 4.5).

$$s_w = \frac{C_p^m \cdot (T^m - T^{aire}) \cdot M_t^m + \Delta G_{vap} \cdot M_0^m \Delta M_w^m}{M_t^m \cdot T^m \cdot x_w^m \cdot Mr_w} \quad (4.5)$$

Donde: C_p^m = calor específico del producto ($1,672 kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, Mujumdar, 2014); T^m = temperatura superficial de la muestra (K); T^{aire} = temperatura del aire que rodea a la muestra (K); M_t^m = masa de la muestra para cada tiempo del proceso de secado (kg); ΔG_{vap} = calor latente de vaporización $2494,4 kJ \cdot kg^{-1}$ (Fletcher, 1970); M_0^m = masa inicial de la muestra (kg); ΔM_w^m = variación de masa de agua de la muestra durante el secado (-); x_w^m = fracción másica de agua de la muestra durante el secado ($kg \cdot kg^{-1}$); Mr_w = masa molecular del agua ($18 g \cdot mol^{-1}$).

Para poder desarrollar la ecuación 4.5, se necesita la temperatura superficial de la muestra durante el proceso. Para ello, se monitorizó el proceso mediante una cámara termográfica. A partir de la ecuación 4.6, con las temperaturas recogidas, se puede calcular la energía recibida por la cámara.

$$E_T = \varepsilon_{cam} \sigma T_{cam}^4 \quad (4.6)$$

Donde: E_T = energía detectada por el pirosensor de la cámara termográfica ($W \cdot m^{-2}$); ε_{cam} = emisividad marcada en el software (-); σ = constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$); T_{cam} = temperatura de la muestra respuesta que proporciona el software de la cámara (K).

Sin embargo, hay dos fenómenos a tener en cuenta en la transformación de la energía que llega al pirosensor a la temperatura superficial real de la muestra. En primer lugar, el fluido situado entre el pirosensor y la muestra emisora (en este caso el fluido es aire) puede no ser totalmente transmisor, induciendo un error por defecto a la energía recibida. En segundo lugar, la energía del entorno produce una sobreestimación de la energía que emite la superficie de la muestra, añadiendo un error por exceso sobre la temperatura medida. Por tanto, es necesario incluir estos fenómenos en la ecuación como ya desarrolló Traffano-Schiffo et al., 2014 (Ecuación 4.7).

$$E_T = F \varepsilon_m \sigma T_m^4 + (1 - \varepsilon_e) \sigma T_e^4 - (1 - \tau_{air}) F \varepsilon_m \sigma T_m^4 \quad (4.7)$$

Donde: E_T = energía detectada por el pirosensor ($W \cdot m^{-2}$); F = factor geométrico; ε = emisividad (-); σ = constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$); T = temperatura (K); τ = transmitancia. Siendo los subíndices: m = muestra; e = entorno; air = aire. El primer término representa el flujo de energía emitido por la muestra, el segundo es el flujo de energía reflejado por el entorno y el tercer término indica el flujo de energía absorbido por el aire. El factor geométrico es 1, ya que el ángulo de disposición de la cámara lo permite (0°). El tercer término se considera despreciable debido a la corta distancia entre la muestra y el pirosensor.

Para saber la temperatura real que está emitiendo la superficie del cuerpo que se está estudiando, a partir de las temperaturas recogidas por la cámara termográfica, es necesario conocer la emisividad de la muestra. Para ello es necesaria una superficie de emisividad conocida y termopares monitorizando la temperatura de la superficie de referencia y la superficie de la muestra en la que no se estaba registrando la masa (ver apartado de materiales y métodos).

Comparando la temperatura de la superficie de referencia recogida con el termopar y la cámara (corregida con su emisividad conocida, $\epsilon = 0,95$) es posible calcular la energía que está sobreestimando por reflexión del entorno (Ecuación 4.8). Una vez conocida esta energía, con los datos de temperatura recogidos con el termopar y la cámara es posible calcular la emisividad de la muestra.

$$E_T^{ref} = \epsilon_{ref} \cdot \sigma \cdot T_{ref}^4 + E_{ent} \quad (4.8)$$

Donde: E_T^{ref} = energía emitida por el material de referencia ($W \cdot m^{-2}$); ϵ_{ref} = emisividad de referencia (0,95) (-); σ = constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$); T_{ref} = temperatura de la superficie de referencia registrada con el termopar (K); E_{ent} = Energía emitida por el entorno ($W \cdot m^{-2}$).

La emisividad muestra la capacidad de la muestra de absorber energía radiante (un cuerpo negro tiene una emisividad de 1), por tanto, su valor varía en función de la energía emitida por el cuerpo, encontrándose una relación como la representada en la Figura 4.3.

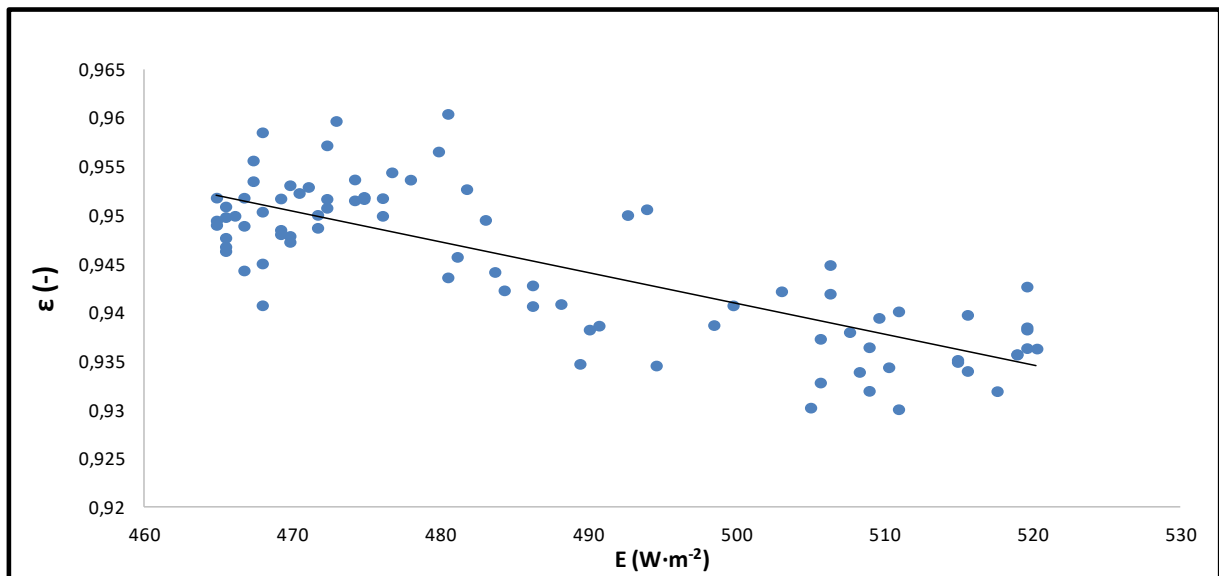


Figura 4.3. Relación de la emisividad de la muestra con la energía emitida por la misma.

Una vez conocida la relación entre la emisividad y la energía emitida, se puede obtener la temperatura de la superficie de la muestra colgada para el registro de la masa. A partir de esa temperatura y conociendo la humedad de la muestra a cada tiempo (calculada por balances de masa con la humedad inicial y la pérdida de masa registrada durante el secado), se puede calcular, mediante la ecuación 4.5, la entropía molar parcial del agua. A partir de la entropía molar parcial del agua se puede calcular el término entrópico de la ecuación 4.4.

Para obtener el último término de la ecuación 4.4, término de actividades, a partir de la humedad para cada tiempo del proceso de secado, se estimó la actividad de agua de la muestra, utilizando la isoterma de sorción de pollo obtenida en el laboratorio de propiedades dieléctricas y modelizada por GAB ($x_{w0} = 0,077$, $C=420$, $K=0.98$) (Hedreza, 2017). Los datos de la isoterma de sorción del presente trabajo se pueden observar en la figura 4.4.

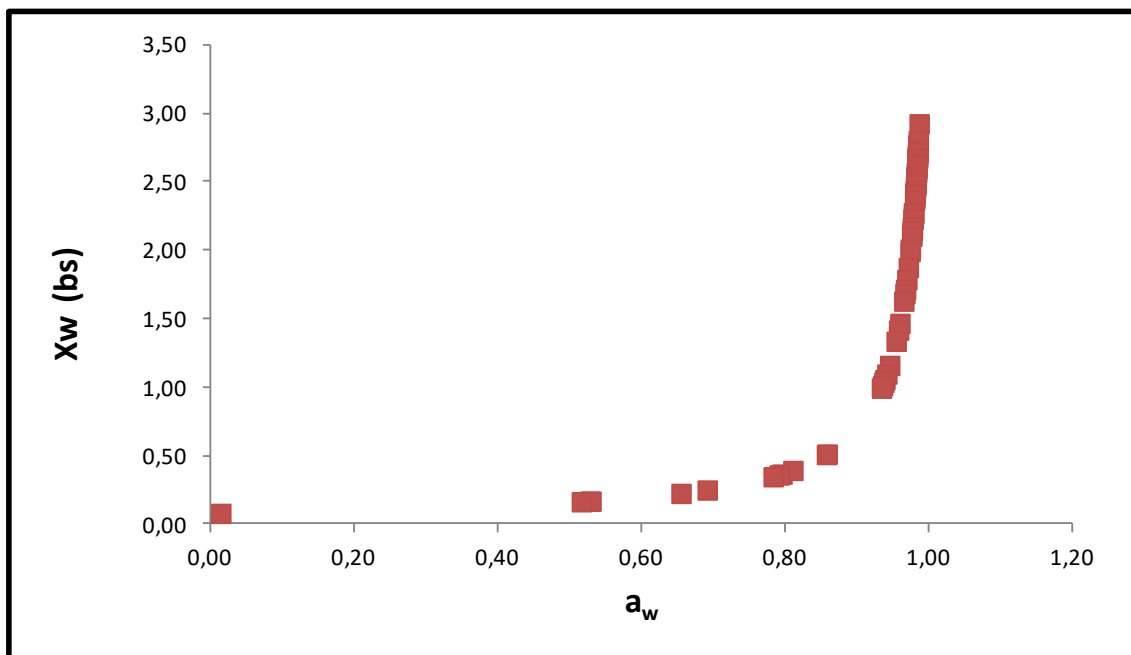


Figura 4.4. Isoterma de sorción de pollo seco con aire caliente.

Conociendo la actividad de agua de la muestra durante el proceso y la humedad relativa del ambiente (dato proporcionado por el secador), se calculó el término de actividades de la ecuación 4.4. Por último, el término de energías

mecánicas de la ecuación 4.4 no es posible calcularlo ya que no se puede medir la variación de presión de la muestra.

Aplicando las relaciones de Onsager (Castro-Giráldez et al., 2010), el flujo molar de agua está relacionado con el potencial químico del agua, como fuerza impulsora del transporte de agua, mediante el coeficiente fenomenológico (Ecuación 4.9). El coeficiente fenomenológico es constante en procesos reversibles, pero si los almacenamientos de energía mecánica producen roturas irreversibles en el medio, el coeficiente fenomenológico evolucionará en función de la transformación sufrida por el tejido.

$$J_w = L_v \cdot \Delta\mu_w \quad (4.9)$$

Donde: J_w = flujo molar de agua ($\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$); L_w = coeficiente fenomenológico ($\text{mol}^2\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$); $\Delta\mu_w$ = potencial químico del agua ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$).

Para poder entender el transporte de agua a lo largo del tejido, es importante estimar el flujo de agua mediante la ecuación (4.10).

$$J_w = \frac{\Delta M_w^m \cdot M_0^m}{\Delta t \cdot S^m \cdot Mr_w} \quad (4.10)$$

Donde J_w es el flujo de agua ($\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$); ΔM_w^m = variación de masa de agua de la muestra durante el secado (-); M_0^m = masa inicial de la muestra (kg); Δt es el tiempo del proceso (s), S^m corresponde con la superficie de la muestra durante el tratamiento (m^2); Mr_w = masa molecular del agua (18 g mol^{-1}).

A partir de la ecuación 4.10 se obtuvo el flujo de agua durante el tratamiento (Figura 4.5).

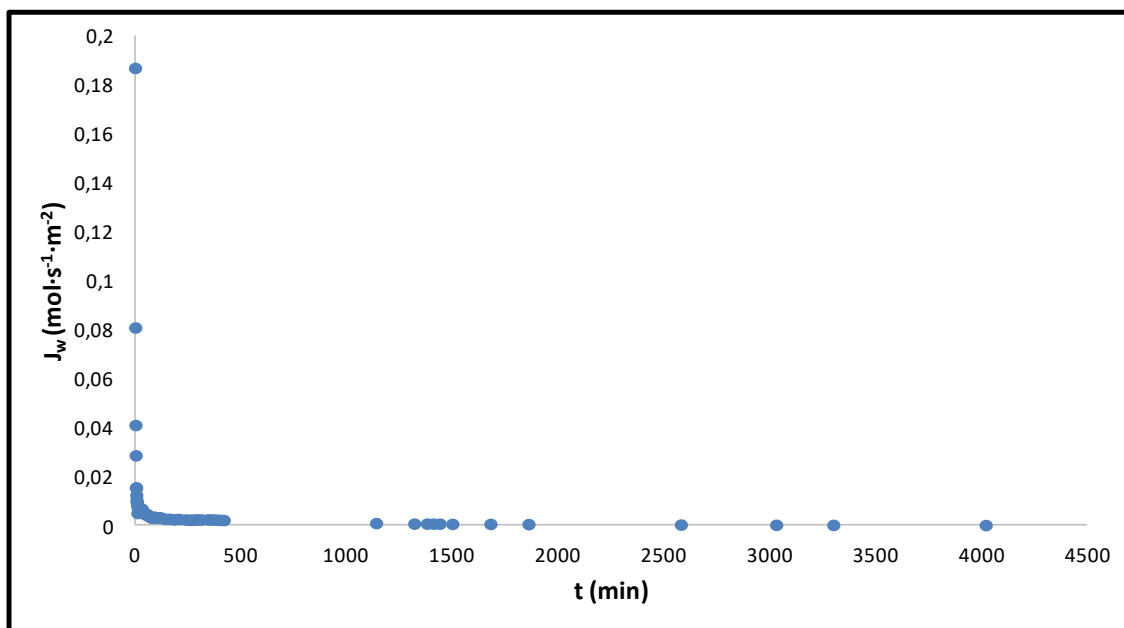


Figura 4.5. Flujo de agua durante el tratamiento de secado.

Tal y como se ha explicado anteriormente, no es posible calcular el término mecánico del potencial químico, por ello se ha determinado el potencial químico de agua sin considerar los términos mecánicos ($\Delta\mu_w^*$) mediante la ecuación 4.9.

$$\Delta\mu_w^* = -s_w (T^{aire} - T^m) + RT^m \ln \frac{a_w^m}{\phi^{aire}} \quad (4.11)$$

Aplicando las ecuaciones 4.9 y 4.11 es posible obtener el coeficiente fenomenológico sin considerar el término mecánico (L_w^*) (Ecuación 4.12).

$$L_w^* = \frac{J_w}{\Delta\mu_w^*} \quad (4.12)$$

En la figura 4.6, es posible observar la relación de L_w^* con respecto al flujo de agua (J_w). En la gráfica se puede apreciar que existe una relación lineal entre el coeficiente fenomenológico sin considerar los términos mecánicos y el flujo de agua a partir de los 15 minutos de secado (Figura 4.6. b). Por lo tanto, siguiendo esa predicción lineal del coeficiente fenomenológico y extendiéndola para todo el

tratamiento de secado, se podrían estimar los términos mecánicos a partir de la siguiente ecuación:

$$v_w \Delta P = \Delta\mu_w - \Delta\mu_w^* \quad (4.13)$$

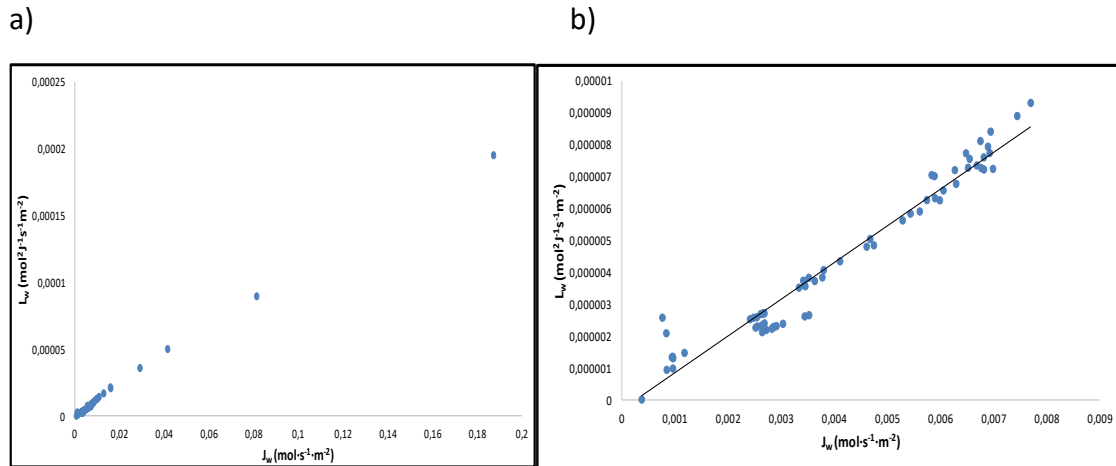


Figura 4.6. a) Relación entre el coeficiente fenomenológico sin considerar los términos mecánicos (L_w^*) y el flujo de agua durante todo el tratamiento de secado. b) Detalle de la relación entre el coeficiente fenomenológico sin considerar los términos mecánicos (L_w^*) y el flujo de agua a partir de los 15 minutos de secado hasta el final del tratamiento.

La evolución de la energía mecánica, desarrollada a partir del modelo termodinámico propuesto, se puede observar en la figura 4.7. En dicha figura se puede apreciar una primera expansión del tejido en los primeros 400 minutos, seguida por una contracción del mismo a partir de ese tiempo asociado al funcionamiento muscular remanente en el tejido.

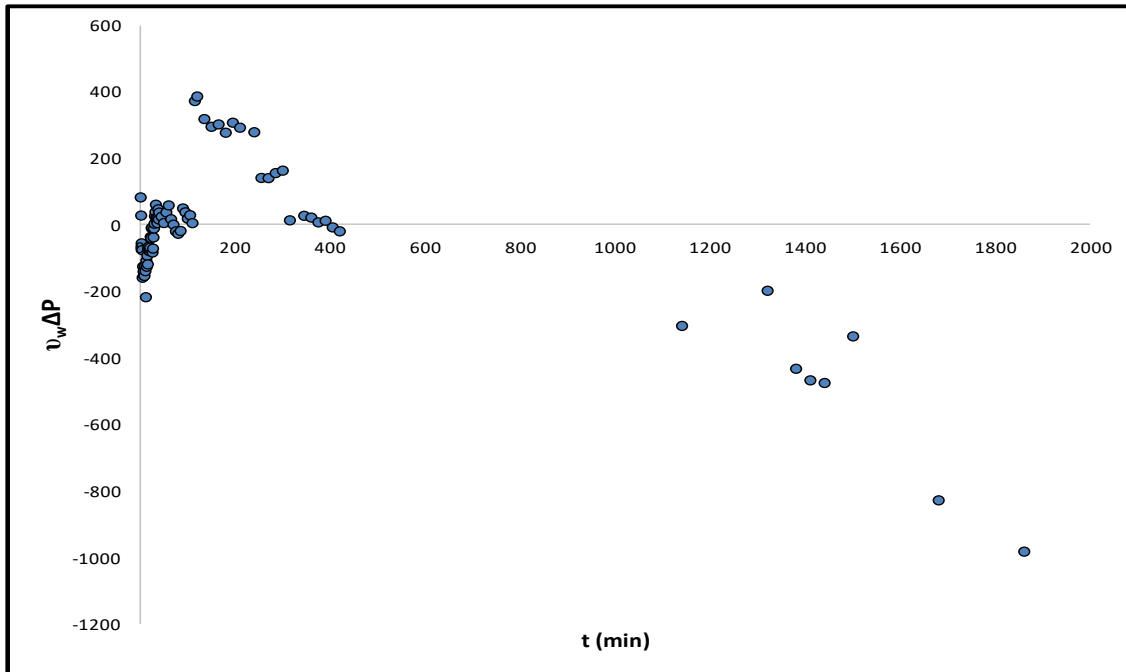


Figura 4.7. Evolución de la energía mecánica, desarrollada a partir del modelo termodinámico propuesto, a lo largo de todo el tratamiento de secado.

4.2. Análisis de la espectrofotometría de Radiofrecuencia

Tal y como se ha explicado en la sección de materiales y métodos, se midió la permitividad en continuo durante la operación de secado. La evolución de los espectros de la constante dieléctrica a lo largo del tratamiento se puede observar en la figura 4.8. Se puede observar que el valor de la permitividad en las dispersiones α y β va disminuyendo a lo largo del tratamiento debido a que se reduce significativamente la humedad de la muestra durante el secado, y con ello se reduce la movilidad de los iones existentes en la carne, así como la movilidad de las cargas fijas, respectivamente.

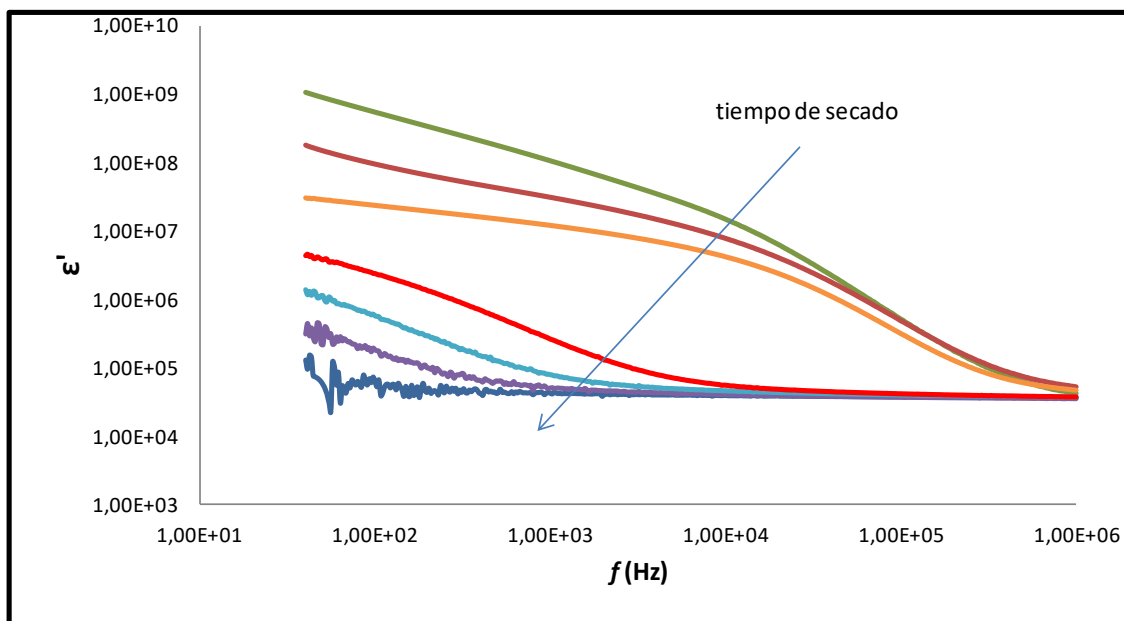


Figura 4.8. Espectro de la constante dieléctrica. Tiempo: ■ 1 minuto; ■ 37 minutos; ■ 55 minutos; ■ 1140 minutos; ■ 1500 minutos; ■ 1860 minutos; ■ 3030 minutos.

Se estudió a nivel puntual el valor de la constante dieléctrica en la dispersión α (40 Hz) y en dispersión β (10 kHz) y su relación con el número de moléculas de agua de la muestra (ecuación 4.14).

$$N_w = \frac{X_w^m N_A}{Mr_w} \quad (4.14)$$

Donde N_w representan las moléculas de agua (moléculas de agua/g_{materia_seca}), X_w^m la humedad de la muestra (bs), N_A el número de Avogadro ($6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) y Mr_w masa molecular del agua (18 g mol^{-1}).

La figura 4.9 muestra una relación lineal ($R^2=0.926$) entre la constante dieléctrica en la dispersión α (40 Hz) y su relación con el número de moléculas de agua cuando la muestra presenta fase líquida, ya esta dispersión está relacionada fundamentalmente con la movilidad de los iones disueltos en la fase líquida de la carne. A partir de un tiempo de secado avanzado, el contenido de fase líquida empieza a disminuir (muestras con agua adsorbida únicamente) y con ello la movilidad de los iones, el valor de la constante dieléctrica en esta dispersión se hace prácticamente nulo.

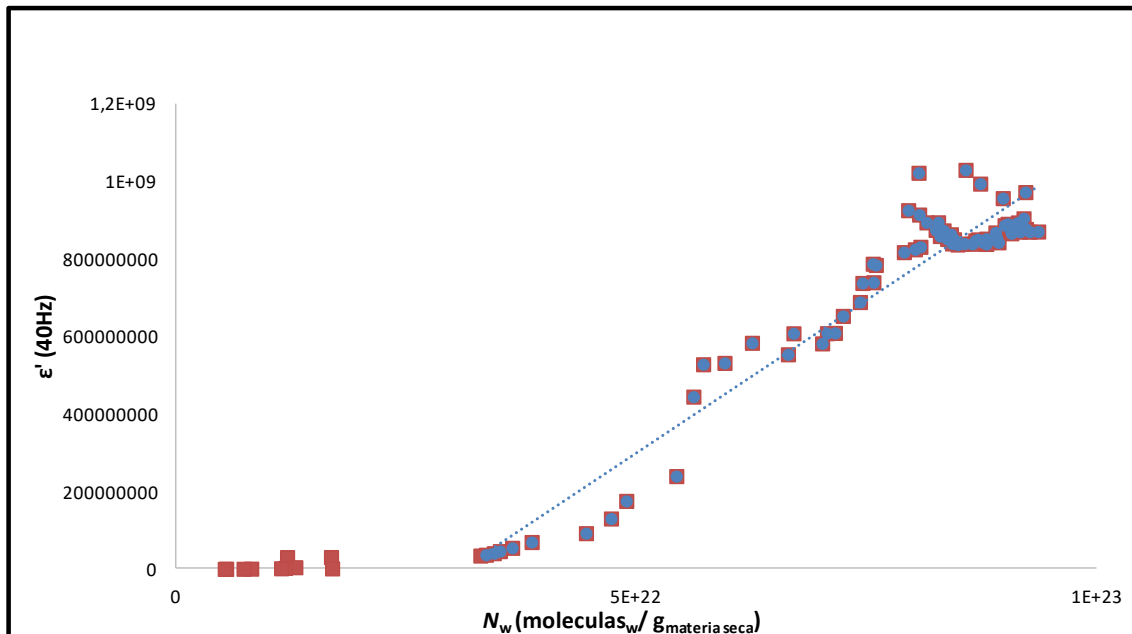


Figura 4.9. Relación entre la constante dieléctrica en la dispersión α (40 Hz) y su relación con el número de moléculas de agua de la muestra durante el tratamiento de secado.

Posteriormente, se trató de analizar la relación entre la constante dieléctrica en la dispersión β (10 kHz) y su relación con el número de moléculas de agua de la muestra. La figura 4.10 muestra una relación lineal entre ambos parámetros con un mejor coeficiente de correlación ($R^2=0.984$); esto puede ser debido a que esta dispersión está relacionada fundamentalmente con la movilidad de las cargas fijas que componen las proteínas y su movilidad sí que se ve afectada por el agua adsorbida, afectando de esta manera a la permitividad en la dispersión β , mostrándose una mejor correlación entre ambos parámetros.

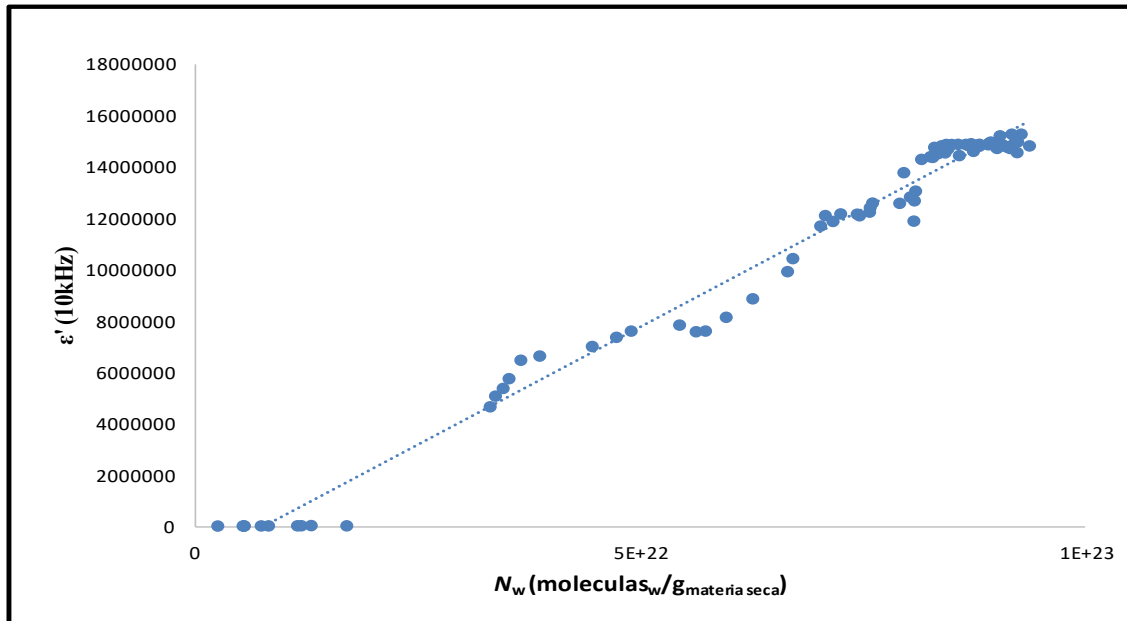


Figura 4.10. Relación entre la constante dieléctrica en la dispersión β y su relación con el número de moléculas de agua de la muestra durante el tratamiento de secado.

Como se ha observado una buena relación entre la constante dieléctrica en la dispersión β y las moléculas de agua, es posible desarrollar una isoterma de sorción basada en la medida de permitividad para poder predecir la actividad de agua de la muestra durante el proceso de secado (Figura 4.11).

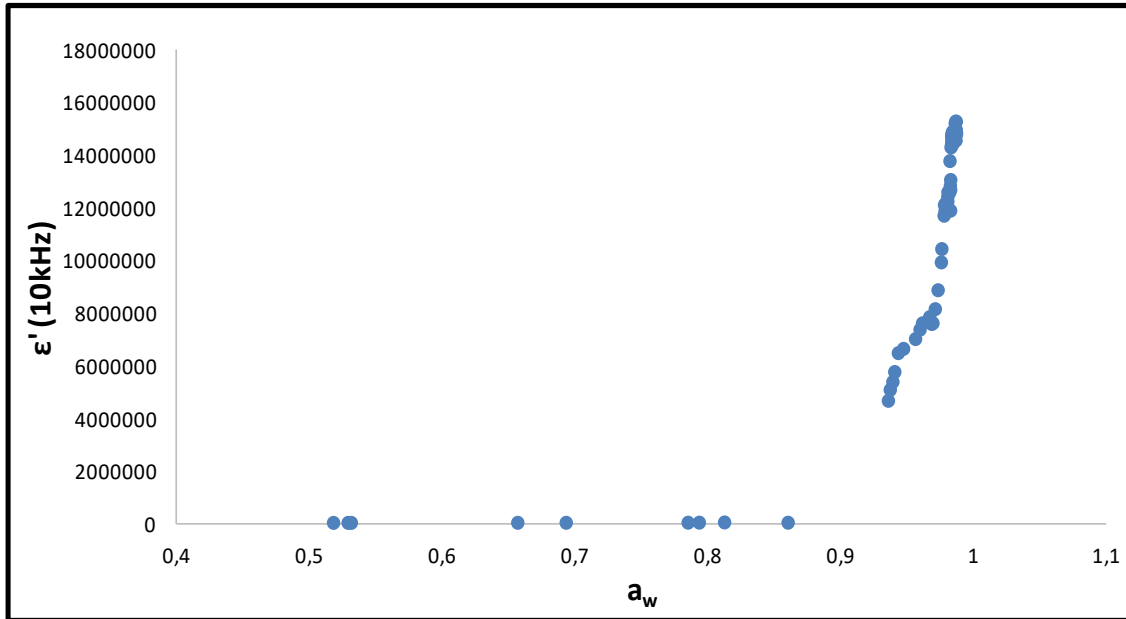


Figura 4.11. Relación entre la constante dieléctrica en la dispersión β y la actividad de agua durante el proceso de secado.

5. CONCLUSIONES

Se ha podido demostrar que la termografía infrarroja es una buena herramienta para controlar el proceso de secado de carne de pollo, proporcionando información sobre la transferencia de calor en los tejidos biológicos, siendo posible obtener la evolución de la emisividad de la carne. Así, con esta técnica, es posible obtener de manera no invasiva la temperatura superficial de la muestra durante el tratamiento.

Se ha desarrollado un modelo termodinámico que permite predecir los fenómenos de expansión/contracción de la carne de pollo a través del proceso de secado, así como evaluar las fuerzas impulsoras del proceso de secado. Por último, se ha demostrado una relación directa entre la permitividad en la dispersión α con respecto al número de moléculas de agua. Con esta nueva técnica, también fue posible obtener la isoterma de desorción con el objetivo de predecir la actividad del agua de la muestra. Así, podemos concluir que la permitividad es un método no destructivo y rápido para poder monitorizar la evolución del proceso de secado.

6. BIBLIOGRAFIA

Akanbi, C. T., Adeyemi, R. S., & Ojo, A. (2006). Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of food engineering*, 73(2), 157-163.

Castro-Giráldez, M.; Fito, P.J.; Fito P. (2010). Non-equilibrium thermodynamic approach to analyze the pork meat (*Longissimus dorsi*) salting process. *Journal of Food Engineering*, 99(1):24-30.

Clemente, G., Bon, J., Sanjuán, N., & Mulet, A. (2011). Drying modelling of defrosted pork meat under forced convection conditions. *Meat science*, 88(3), 374-378.

Doymaz, I., & Pala, M. (2002). Hot-air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 55(4), 331-335.

Fito, P., Grau, A. M. A., Sorolla, A. M. A., & Baviera, J. M. B. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente (pp. 43-49). Ed. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. España.

Fletcher N.H. (1970). *The Chemical Physics of Ice*, (Cambridge University Press) pp. 54.

Gou, P., Comaposada, J., & Arnau, J. (2002). Meat pH and meat fibre direction effects on moisture diffusivity in salted ham muscles dried at 5 C. *Meat science*, 61(1), 25-31.

Hedra, J. (2017). Estudio de secado combinado de aire caliente y microondas mediante espectrofotometría de baja frecuencia. Tesis de máster, Instituto de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo, Valencia, España.

Huff Lonergan, E., Zhang, W., & Lonergan, S. M. (2010). Biochemistry of postmortem muscle—Lessons on mechanisms of meat tenderization. *Meat science*, 86(1), 184-195.

Huff-Lonergan, E. (2010). Chemistry and biochemistry of meat. In F. Toldrá (Eds.), *Handbook of meat processing* (pp. 5-24). Wiley-Blackwell, Iowa.

Kuang, W., & Nelson, S. O. (1997). Low-frequency dielectric dispersion from ion permeability of membranes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 193(2), 242-249.

Mujumdar A.S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*, Fourth Edition. Ed: CRC Press. Pag: 529.

Pearce, K.L.; Rosenvold, K.; Andersen, H.J.; Hopkins, D.L. (2011). Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes—a review. *Meat Sci.*, 89:111–124.

Ponce-Alquicira, E. (2006). Cambios bioquímicos pre y postmortem. En Hui, Y.H.; Guerrero, I.; Rosmini, M.R. (Eds.), *Ciencia y tecnología de carnes* (pp.111-135). Limusa, México D.F.

Traffano-Schiffo, M.V. (2017). *Espectrofotometría de Baja Frecuencia aplicada a Sistemas Alimentarios*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Traffano-Schiffo, M. V., Castro-Giráldez, M., Fito, P. J., & Balaguer, N. (2014). Thermodynamic model of meat drying by infrared thermography. *Journal of Food Engineering*, 128, 103-110.

Traffano-Schiffo, M.V.; Castro-Giraldez, M.; Colom R.J.; Fito P.J. (2017). Development of a Spectrophotometric System to Detect White Striping Physiopathy in Whole Chicken Carcasses. *Sensors*, 17(5):1024.

Vadivambal, R.; Jayas, D.S. (2011). Applications of thermal imaging in agriculture and food industry-a review. *Food and Bioprocess Technology*, 4(2):186-199.

Workmaster B. A., Palta, J. P., & Wisniewski, M., (1999). Ice nucleation and propagation in cranberry uprights and fruit using infrared video thermography. *Journal of the American Society for Horticultural Science, USA*, 124, 619.