

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. FRITURA DE ALIMENTOS

### 1.1.1. GENERALIDADES

Existen evidencias de que la humanidad ha venido utilizando la fritura como un método de preparación de alimentos desde hace cientos de años, pero es desde los años 50 del siglo XX, cuando se le empieza a considerar como un proceso que merece la atención por parte de la ciencia y de la tecnología (Stier, 2004).

La gran expansión de la utilización de la fritura se debe principalmente a que los alimentos, tras este proceso, adquieren unas características únicas de aroma y textura que no es posible conseguir con otras técnicas de procesado de alimentos (Moreira, 2001; Rimac *et al.*, 2004; Saguy y Dana, 2003). Además, desde el punto de vista económico el sector de alimentos fritos ha experimentado un crecimiento importante, especialmente el de *snacks* (aperitivos) y los denominados comida rápida. Por ejemplo, el mercado español de productos de aperitivo facturó 1.551 millones de euros en 2004, y para el 2006 se esperaba un crecimiento del 5,5%. La mayoría de esta facturación corresponde a las ventas del segmento de patatas fritas, que continúan siendo el producto preferido por los consumidores, seguido de los frutos secos y el resto de *snacks* (Alimentatec, 2006). De ahí la gran importancia de profundizar en el conocimiento del proceso de fritura.

Fritura al vacío

La fritura de los alimentos puede definirse como el proceso de cocción de alimentos por inmersión en aceite o grasa a una temperatura superior al punto de ebullición del agua, normalmente entre 150 y 200°C (Kochhar y Gertz, 2004; Varela *et al.*, 1998).

Además de los cambios organolépticos que provoca la fritura, un efecto adicional es la preservación del alimento, como resultado de la destrucción de los microorganismos e inactivación de enzimas por efecto del calor y de la reducción de la actividad de agua, sea en la superficie o dentro del alimento, cuando éste se procesa en finas láminas (Fellows, 1998).

### 1.1.2. EL PROCESO DE FRITURA

Como se ha indicado en el apartado anterior, el proceso de fritura consiste en sumergir el alimento en aceite o grasa caliente a altas temperaturas y a presión atmosférica, estas temperaturas son muy superiores al punto de ebullición del agua a esta presión. La diferencia de temperatura entre el alimento y el aceite desencadena un proceso simultáneo de transferencia de calor y de materia. El calor es transferido del aceite al alimento y sirve para evaporar el agua del alimento, pasando al aceite como burbujas de vapor; además, el aceite va a penetrar en el alimento. Al mismo tiempo las propiedades físicas del alimento varían con los cambios de temperatura y de humedad que suceden en el interior del mismo (Moreira, 2001; Sahin *et al.*, 1999b; Vitrac *et al.*, 2000).

Durante el proceso de fritura tienen lugar multitud de cambios físicos, químicos y nutricionales en el alimento. Estos cambios dependen, entre otros factores, de la humedad y del tipo de alimento, de la calidad de aceite utilizado y de la temperatura del proceso, así como del tiempo de residencia del producto en el aceite caliente (Dobarganes *et al.*, 2000; Moreira, 2001).

### 1.1.2.1. Transferencia de calor y de materia

La fritura involucra simultáneamente los mecanismos de transferencia de masa y de calor (Moreira, 2001).

Al sumergir el alimento en el aceite caliente la transferencia de calor se realiza por dos mecanismos: conducción y convección. La transferencia de calor por conducción, bajo condiciones no estacionarias, tiene lugar en el interior del alimento. La magnitud de esta transferencia está influenciada por las propiedades térmicas del alimento y éstas pueden cambiar durante el proceso. La convección ocurre entre el aceite caliente y la superficie del alimento (Singh, 1995).

La transferencia de materia durante la fritura está caracterizada, principalmente, por el movimiento del agua en forma de vapor, del alimento al aceite, y por el movimiento del aceite al alimento. Esta transferencia de materia es impulsada por la transferencia de calor del aceite al alimento, por ello es inevitable describir ambos fenómenos de transferencia de forma conjunta.

Como resultado de los fenómenos de transferencia que tienen lugar en la fritura, el producto final presenta dos regiones características: la costra o superficie deshidratada, en la cual se producen los principales cambios, y el interior del alimento donde la temperatura no sobrepasa la temperatura de ebullición del agua a esa presión (Dobarganes *et al.*, 2000; Singh, 1995).

Cuando el alimento ingresa en el aceite caliente, el calor de éste es transferido al alimento, el cual rápidamente se calienta y cuando el agua alcanza su punto de ebullición empieza a evaporarse y pasa al aceite. Por este motivo la fritura puede considerarse como un proceso de deshidratación (Stier, 2004) y el comportamiento de la cinética de transferencia de agua es similar al producido en cualquier proceso de deshidratación, como puede ser el llevado a cabo utilizando aire caliente (Baumann y Escher, 1995).

## Fritura al vacío

Farkas *et al.* (1996a) distinguen tres periodos durante la fritura atendiendo a la transferencia de calor y agua. Primero tiene lugar la etapa de calentamiento del alimento. Esta etapa se inicia con la inmersión del alimento en el aceite caliente a alta temperatura y termina cuando la superficie del alimento alcanza la temperatura de ebullición del agua superficial. Como se indicó antes, el calor es transferido por convección natural desde el aceite hacia la superficie del alimento y por conducción desde la superficie al interior del mismo. Tiene una duración muy corta y se caracteriza porque todavía no se detecta la presencia de burbujas de vapor de agua. Esta etapa se identifica con la de velocidad de secado creciente.

En la segunda etapa la cantidad de calor transferido es suficiente para que el agua presente en la superficie del alimento alcance condiciones de ebullición; esto produce un incremento en el coeficiente de transferencia de calor por convección, resultando un aumento del calor transferido al alimento y, por lo tanto, la pérdida de agua del alimento también se incrementa, ocasionando que se pueda observar como una explosión de burbujas de vapor. En esta etapa empieza formarse la costra en la superficie del alimento y se identifica con la de velocidad de secado constante. Se trata de una etapa muy breve o incluso inapreciable al evaporarse el agua superficial muy rápidamente.

La tercera etapa, también conocida como etapa de velocidad decreciente, es la de mayor duración. Durante esta etapa la temperatura del interior del alimento es cercana al punto de ebullición del agua existente en el mismo y se elimina la mayor cantidad de agua de su interior. Dado que la costra sigue aumentando de espesor, y por su baja conductividad térmica, disminuye la transferencia de calor y, por ende, la salida de agua del interior del alimento. El fin de esta última etapa, conocido como punto final de la ebullición, se produce cuando aparentemente ya no se aprecia la salida de burbujas de vapor del alimento. Esto puede ser ocasionado por la reducción de la transferencia de calor en la interfase costra e interior del alimento, o por la eliminación total del agua del alimento.

La cinética de absorción de aceite por parte del producto es más compleja, porque mientras el vapor esté presente en los poros del alimento, impedirá el paso del aceite al interior del mismo, y sólo cuando disminuya la salida del vapor el aceite podrá transferirse al alimento, si bien dependerá de las propiedades de permeabilidad de la costra formada en la superficie del alimento. Así, cuando el alimento es retirado del aceite caliente y empieza el enfriamiento, la presión del vapor disminuye y produce un efecto de succión, ayudando a que el aceite depositado en la superficie del alimento pueda atravesar la costra (Vitrac *et al.*, 2000). Moreira, *et al.* (1995) observaron que mientras transcurre el tiempo de fritura aumenta la cantidad de aceite que se encuentra en la superficie del alimento (en su caso en tortillas de maíz) y que el contenido final de aceite en el alimento se incrementa considerablemente en el período de enfriamiento y está regido por fuerzas capilares.

Los principales parámetros que influyen en la pérdida de agua y la absorción de aceite son la temperatura y el tiempo de fritura (Dobarganes *et al.*, 2000; Moreira, 2001). Otros parámetros a considerar son la forma del alimento y la relación entre el tamaño del producto y la superficie expuesta al medio circundante.

Así, Baumann y Escher (1995) exponen que al incrementar la temperatura la velocidad de deshidratación aumenta, reduciéndose el tiempo de fritura; en cambio, al aumentar el espesor del producto se incrementa el tiempo. Para Krokida *et al.* (2000) el transporte de agua y aceite es más intenso cuanto mayor es la temperatura del aceite y menor el espesor de la muestra. Por ejemplo, si el alimento se procesa en láminas, aquellas más gruesas presentan una menor área específica, reduciéndose el área relativa disponible para perder el agua; también el camino interno que tiene que recorrer el agua es más largo y se requiere más calor para evaporar dicha agua, además la corteza que se forma impide que el agua salga con facilidad (Costa y Oliveira, 1999).

Fritura al vacío

Gamble *et al.* (1987) observaron que el contenido de aceite no estaba directamente relacionado con la temperatura de fritura, sino con la humedad residual del alimento. Esto lo corroboran Moreira, *et al.* (1995) que demuestran que la mayor retención de aceite en el producto tiene lugar cuando la mayor cantidad de agua ha salido del mismo. Además, la pérdida de agua no es uniforme en el producto, primero ocurre en la superficie y, según transcurre el calentamiento, gradualmente va afectando al interior del mismo. Por ello, la absorción de aceite tiene lugar en mayor grado a nivel superficial (Costa y Oliveira, 1999).

Yamsaengsung y Moreira (2002b) indican que cuando la temperatura del aceite es alta, el secado es más rápido, además la temperatura y presión del producto aumentan rápidamente. La absorción de aceite empieza a tener lugar cuando la temperatura del producto se incrementa y empieza a formarse la costra. Si el espesor del producto es más grueso, disminuye el contenido de aceite en el interior del mismo. El contenido de aceite se ve afectado también por la temperatura a la que se enfría el producto, si es a una temperatura cercana a la del producto no absorberá mucha cantidad de aceite.

Finalmente, y en lo referente a la influencia del tipo de aceite sobre la velocidad de absorción del mismo, de acuerdo con Dobarganes (2000) la absorción de aceite depende en mayor grado de la calidad del aceite que del tipo de aceite utilizado en el proceso.

### 1.1.3. CALIDAD DE LOS ALIMENTOS PROCESADOS POR FRITURA

Como consecuencia del proceso de fritura el alimento sufre una serie de reacciones y transformaciones debidas principalmente a la alta temperatura del

proceso, a la extracción del agua que tiene lugar y al aumento del contenido de aceite (Vitrac *et al.*, 2000). Todo ello provoca una serie de cambios deseables en el producto como son la formación de la costra, el desarrollo del color característico, aroma, sabor y textura (Fellows, 1998). De ahí que la calidad de los productos obtenidos por fritura se evalúe a partir de parámetros organolépticos, principalmente el color y la textura (Stier, 2004).

El efecto de la fritura sobre el valor nutricional de los alimentos depende de las condiciones del proceso. En general, las temperaturas altas contribuyen a que la costra se forme más rápidamente y esto impide, en gran parte, la migración de nutrientes desde el interior del alimento hacia el aceite. Además, existe evidencia de que la utilización de aceite con vitamina E resulta en un enriquecimiento del alimento con esta vitamina. Por otro lado puede darse la oxidación de vitaminas liposolubles y, por ende, una disminución del valor nutricional del alimento (Fellows, 1998; Saguy y Dana, 2003).

La calidad del alimento es afectada por la calidad del aceite utilizado en la fritura, pero también el alimento puede influir negativamente en el deterioro de la calidad de aceite, esto es porque puede tener lugar la migración de compuestos minoritarios del alimento al aceite, y producir cambios de tal manera que disminuyan la calidad o el comportamiento del aceite durante la fritura (Dobarganes *et al.*, 2000). Además, si el aceite utilizado en la fritura permanece a altas temperaturas durante un tiempo prolongado, en presencia de oxígeno y del agua proveniente del alimento, causa la oxidación del mismo y contribuye a la formación de compuestos volátiles y no volátiles, así como a la polimerización de aceite. De los compuestos formados algunos contribuyen al sabor característico del alimento frito, pero otros compuestos pueden dar sabores y olores desagradables y oscurecer el aceite. De ahí la importancia de controlar la calidad del aceite de fritura durante el proceso (Fellows, 1998). Para el control de calidad

Fritura al vacío

se pueden usar métodos rápidos en línea, basados en medidas de viscosidad o medidas ultrasónicas (Benedito *et al.*, 2007).

### **1.1.3.2. Color**

El color dorado es característico y un atributo muy significativo de la calidad de un producto frito y determinante en la aceptación del mismo por parte de los consumidores (Krokida *et al.*, 2001; Sahin, 2000). El pardeamiento no enzimático de muchos vegetales que tiene lugar durante la fritura, conocido como reacción de Maillard, es el resultado de la reacción entre azúcares reductores y aminoácidos a temperaturas elevadas. El color se ve afectado por las condiciones de proceso, principalmente tiempo, temperatura y tipo de aceite, así como por las características del producto, como son el tamaño, la variedad, o las condiciones de almacenamiento previas (Fellows, 1998; Krokida *et al.*, 2001; Sahin, 2000).

### **1.1.3.3. Textura y microestructura.**

La textura que se obtiene tras el proceso de fritura es consecuencia de los cambios producidos en la composición de los alimentos, principalmente en las proteínas y carbohidratos, que se modifican por efecto del calor transferido al alimento y por la eliminación del agua del mismo. Todo ello origina la formación de una costra que proporciona el atributo característico de crujiente al alimento (Fellows, 1998; Pedreschi y Moyano, 2005a). Adicionalmente a la formación de la costra o corteza, en el alimento se pueden apreciar otras modificaciones mecánicas, tales como contracción, expansión, desarrollo de porosidad, ruptura de la matriz sólida, etc. Cuando el alimento es rico en almidón la costra presenta poros más pequeños que en el caso de alimentos que no contienen almidón, y

ésta, por tener los poros más grandes, presenta menos resistencia al paso de gases, sea vapor o aire (Vitrac *et al.*, 2000).

#### 1.1.4. EQUIPOS

Como ya se explicó anteriormente, la fritura consiste en introducir el alimento en aceite caliente a altas temperaturas y generalmente a presión atmosférica. Los equipos necesarios para este proceso variarán en función del tipo y tamaño de producción. Así, a nivel industrial permiten mantener sumergido completamente al alimento, sea la producción por lotes o continua; en cambio, a nivel domestico el alimento permanece flotando en el aceite (Vitrac *et al.*, 2000).

En los equipos de producción por lotes, el alimento se introduce en un baño de aceite caliente y permanece en su interior hasta conseguir el grado de fritura requerido. En los equipos para producción continua, el alimento se coloca sobre un transportador de malla que se sumerge en un tanque de aceite caliente. El aceite puede ser calentado por medio de electricidad, gas, vapor o combustible. Asimismo, estos equipos disponen de controles de temperatura, estando las temperaturas típicas de trabajo entre 160 y 200°C (Fellows, 1998; Moreira, 2001). Finalmente, destacar que el material utilizado para este tipo de equipos es el acero inoxidable.

Fritura al vacío

## 1.2. FRITURA AL VACÍO DE ALIMENTOS

### 1.2.1. GENERALIDADES

La fritura con aceite a alta temperatura determina una considerable absorción de éste y una pérdida de vitaminas, por lo que puede resultar que el producto sea menos nutritivo. Además, en los últimos años la tendencia de los consumidores hacia alimentos bien con bajo contenido de grasa o bien libres de ésta, ha forzado a la industria de los *snacks* a elaborar productos con estas cualidades pero que a la vez mantengan su sabor y textura característicos (Garayo y Moreira, 2002). De ahí que las investigaciones encaminadas a reducir los niveles de contenido de grasa en los alimentos fritos hayan cobrado fuerza, ya sea modificando las condiciones de proceso, modificando el medio de fritura o aplicando ciertos pretratamientos al alimento como son el escaldado, la inmersión en soluciones azucaradas o la aplicación de coberturas comestibles (García *et al.*, 2002; Mellema, 2003; Pedreschi *et al.*, 2005a; Pedreschi y Moyano, 2005b; Rimac *et al.*, 2004).

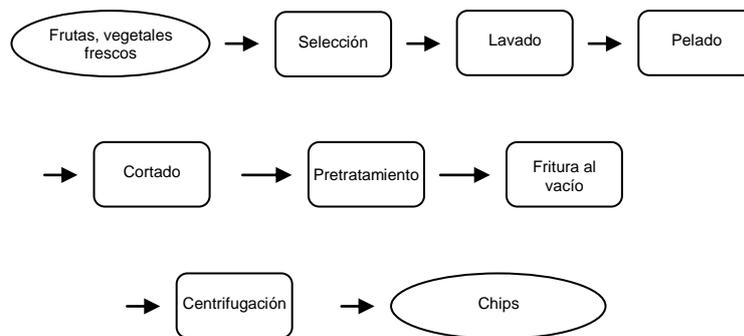
La fritura al vacío destaca entre los procesos estudiados para conseguir dichos objetivos de mejora de la calidad. En esta operación el alimento se procesa a presión subatmosférica en un sistema cerrado, lo que permite disminuir la temperatura de ebullición del agua y, por tanto, la temperatura de fritura. De esta forma, el agua contenida en el alimento se elimina rápidamente cuando el aceite alcanza la temperatura de ebullición del agua (Shyu *et al.*, 2005). Otra ventaja de la fritura al vacío es que conserva mejor el color y sabor naturales de los alimentos por la baja temperatura y el bajo contenido de oxígeno, lo cual permite también prolongar la vida útil del aceite (Liu-Ping *et al.*, 2005a). La temperatura del aceite en este tipo de proceso se suele situar alrededor de 110°C y la presión alrededor de 3.1 kPa, siendo 24.7°C la temperatura de ebullición del agua a esta presión

(Garayo y Moreira, 2002). La fritura al vacío es una tecnología que no está ampliamente extendida en el mercado y actualmente se dirige a obtener productos tipo *snacks* de alimentos cuya calidad puede verse afectada por las altas temperaturas, como son frutas y vegetales.

### 1.2.2. EL PROCESO DE FRITURA AL VACÍO.

Como se ha dicho anteriormente, el proceso de fritura al vacío es básicamente el mismo que el de la fritura convencional pero en este caso se efectúa en un sistema cerrado, lo que permite reducir la presión hasta niveles considerablemente inferiores a la presión atmosférica. Además, hay que tener en cuenta los tratamientos previos y posteriores que se aplican al alimento.

En la figura 2.2.1 se presenta un esquema general del proceso de fritura al vacío adaptado de otros trabajos publicados (Garayo y Moreira, 2002; Shyu *et al.*, 2005; Shyu y Hwang, 2001) que evidentemente puede ser diferente en algunos casos, principalmente en lo que respecta al pretratamiento.



**Figura 1.2.1.** Esquema del proceso de fritura al vacío.

Fritura al vacío

### **1.2.2.1 Transferencia de agua en la fritura al vacío**

En la fritura al vacío, al igual que se vio en la fritura convencional, las curvas de pérdida de humedad son semejantes a las curvas del clásico perfil de secado.

Como se indicó en el apartado 1.1.2.1, el proceso de secado de alimentos se caracteriza generalmente por tres periodos. El primero es el de calentamiento inicial durante el cual el material absorbe el calor del medio de calentamiento. El producto se calienta hasta la temperatura a la cual el agua presente en el alimento empieza a evaporarse. En la fritura al vacío este periodo inicial es muy rápido, por lo que resulta difícil su cuantificación. Esto se evidencia, por ejemplo, al realizar la fritura a una presión de 3.1 kPa (el punto de ebullición del agua a esta presión es alrededor de 25°C), ya que si el alimento está a temperatura ambiente (23-24°C) se precisa aumentar su temperatura unos pocos grados para que el agua empiece a evaporarse.

En el segundo período, o de velocidad constante, la velocidad de secado viene limitada por el calor transferido del medio de calentamiento al alimento. Este periodo tiene lugar mientras exista agua en la superficie del alimento. En el caso de la fritura al vacío, en general no se observa ningún periodo de velocidad constante por la alta velocidad de evaporación del agua superficial (Garayo y Moreira, 2002; Liu-Ping *et al.*, 2005b).

Cuando el contenido de agua en la superficie del alimento es bajo, empieza el periodo de velocidad decreciente del secado o tercer periodo. Durante este periodo la velocidad de secado es controlada por un mecanismo de transferencia de la humedad dentro del alimento, descrito frecuentemente como difusión a partir de la ley de Fick. El agua durante este periodo se mantiene en el material por la adsorción multicapa y condensación capilar (Toledo, 1991).

En cuanto a la influencia de las condiciones del proceso sobre la humedad del producto, los resultados de los estudios revisados coinciden (Garayo y Moreira, 2002; Liu-Ping *et al.*, 2005b; Shyu *et al.*, 2005; Shyu y Hwang, 2001). Así, a una determinada temperatura cuanto mayor es el grado de vacío, la velocidad de evaporación aumenta y, por tanto, mayor es la velocidad de secado. Respecto al efecto de la temperatura, a una determinada presión, cuando la temperatura aumenta, aumenta la velocidad de secado y por tanto disminuye el tiempo de fritura.

#### **1.2.2.2. Transferencia de aceite en la fritura al vacío**

Al igual que en la fritura convencional, la absorción de aceite en la fritura tiene lugar mayoritariamente una vez extraído el producto del aceite, durante el proceso de enfriamiento. No obstante, tal y como se describe a continuación, en este caso hay que tener en cuenta la influencia de la etapa de presurización sobre la absorción de aceite.

Para describir los mecanismos de transferencia de aceite en la fritura al vacío Garayo y Moreira (2002) dividen el proceso en tres etapas: fritura, presurización y enfriamiento. Al inicio del periodo de la fritura la temperatura de ebullición del agua está muy por debajo de los 100°C, por ejemplo a una presión de vacío de 8 kPa el agua tiene una temperatura de ebullición de 41.5°C, por eso el agua se evaporará más fácilmente; la salida del vapor de agua y la baja diferencia de presión entre el interior de los poros del alimento y el aceite no permite que éste penetre en el mismo. Una vez terminada la fritura, el alimento se retira del aceite caliente y empieza a introducirse aire en el equipo (que permanece aun cerrado) para recuperar la presión atmosférica. En esta etapa, conocida como presurización, la presión en los poros se incrementa rápidamente hasta los niveles de presión atmosférica, de forma que el aire y el aceite de la superficie del alimento van

## Fritura al vacío

llenando los espacios vacíos de los poros hasta que la presión se recupera. Sin embargo, a baja presión el aire se introduce más rápidamente que el aceite dentro del espacio del poro, debido a que la densidad del aire disminuye con la presión más que la del aceite, y obstruye el paso de este último hacia el interior del producto. La tercera etapa empieza cuando el alimento es retirado del equipo de fritura y se conoce como enfriamiento. En esta etapa, parte del aceite que se encuentra en la superficie continúa penetrando en los poros del alimento, del mismo modo que en la fritura a presión atmosférica. Puesto que con este proceso se adhiere menos aceite a la superficie del producto, existe menos aceite disponible para penetrar durante esta etapa.

En cuanto al efecto de la temperatura en la absorción de aceite por el producto, Garayo y Moreira (2002) observaron que durante los 150 s iniciales el contenido de aceite de los *chips* de patata aumentaba con el tiempo a todas las temperaturas ensayadas, siendo mayor cuanto mayor era la temperatura. No obstante, el contenido final de aceite no se ve afectado significativamente por la temperatura del aceite. Por ello sugieren que el contenido final de aceite, más que de la temperatura depende del tiempo de fritura, ya que cuando disminuye la temperatura del aceite y se pretende conseguir un mismo nivel de humedad final se debe aumentar el tiempo de fritura.

Por el contrario, Shyu y Hwang (2001) y Shyu *et al.* (2005) observaron en *chips* de manzana y zanahoria respectivamente, que el contenido de aceite aumentaba con la temperatura y tiempo de fritura. Si bien, también señalan que el contenido en aceite parece estar relacionado con el contenido de humedad final.

En cuanto al efecto de la presión, Garayo y Moreira (2002) observaron que cuando aumenta el nivel de vacío aumenta la velocidad de pérdida de agua y también la absorción de aceite. Pero al final del proceso, para una misma humedad final, no encontraron diferencias significativas en el contenido de aceite. Esto parece

indicar que el contenido de aceite es función del contenido final de humedad en el producto y de la cantidad de aceite que está adherida a la superficie.

### 1.2.3. TRANSFERENCIA DE CALOR

En el proceso de fritura al vacío, por el hecho de estar a presiones menores a la atmosférica, el punto de ebullición del agua es menor que a presión atmosférica (Garayo y Moreira, 2002), en consecuencia la temperatura del medio para conseguir evaporar el agua es menor, por lo tanto las temperaturas del aceite serán más bajas (Yamsaengsung y Rungsee, 2006). Por consistir básicamente en el mismo proceso que la fritura a presión atmosférica, el mecanismo de transferencia de calor, es similar al descrito en el apartado 1.1.2.1.

### 1.2.4. CALIDAD DE PRODUCTOS PROCESADOS POR FRITURA AL VACÍO

La mayoría de los trabajos de investigación desarrollados en el campo de la fritura al vacío pretenden establecer las condiciones óptimas para desarrollar un producto final con buenas características organolépticas tales como textura, color y sabor; en cambio, en otros trabajos los objetivos son analizar la calidad del aceite utilizado (Kitson *et al.*, 1997), disminuir el contenido final de aceite (Garayo y Moreira, 2002; Shyu *et al.*, 2005; Shyu y Hwang, 2001), reducir la formación de acrilamida (Granda y Moreira, 2005; Granda *et al.*, 2004) y determinar la vida de anaquel de chips de zanahoria (Liu-Ping *et al.*, 2007).

Para conseguir estos objetivos se ha estudiado como afecta la variación de los parámetros del proceso de fritura al vacío y la aplicación de distintos

Fritura al vacío

pretratamientos y post-tratamientos a la calidad organoléptica del alimento. Los parámetros más importantes en el proceso de fritura son los citados anteriormente: temperatura del aceite, nivel de presión de vacío, y tiempo de fritura.

Entre los alimentos comúnmente utilizados en los procesos de fritura a presión reducida se describen: manzana (Kitson *et al.*, 1997; Shyu y Hwang, 2001), zanahoria (Liu-Ping *et al.*, 2005a; Liu-ping *et al.*, 2006; Shyu *et al.*, 2005), patata (Garayo y Moreira, 2002; Sijbring, 1969), *donuts* (Tan y Mittal, 2006) cebolla y calabaza (Kawamura, 1987). Además, se tiene constancia de estudios realizados con productos de la pesca en países asiáticos.

#### **1.2.4.1. Pretratamientos**

Entre los pretratamientos utilizados en la fritura al vacío destacan el escaldado o blanqueo, la congelación y la inmersión en soluciones azucaradas, tratamientos que pueden ser aplicados independientemente (Kitson *et al.*, 1997) o combinados entre sí (Liu-Ping *et al.*, 2005b; Liu-ping *et al.*, 2006; Shyu y Hwang, 2001). El objetivo principal de éstos es mejorar la textura del alimento, evitando que se produzca una excesiva contracción, y disminuir el contenido final de aceite en el producto.

En la tabla 1.2.4.1 se resumen los principales pretratamientos utilizados en la fritura al vacío de manzana (Shyu y Hwang, 2001) y zanahoria (Liu-Ping *et al.*, 2005a; Liu-ping *et al.*, 2006; Shyu *et al.*, 2005).

**Tabla 1.2.4.1.** Tratamientos previos a la fritura al vacío.

Proceso	Soluto	Concentración [%]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Escaldado <sup>1,3</sup>			95 – 98	1 – 2
	Sal <sup>2, 4</sup>	2	ebullición	2
Inmersión <sup>3</sup>	Fructosa	30	50	15
	Fructosa <sup>1</sup>	50	50	1, 30, 60, 180
	Maltosa <sup>2,4.</sup> Dextrina <sup>2:1</sup>	30		60
Congelación			-30 <sup>1,3</sup>	12 h
			-18 <sup>2, 4</sup>	12 h
Descongelación <sup>1</sup>			ambiente	

Fuente: 1 (Shyu *et al.*, 2005), 2 (Liu-Ping *et al.*, 2005b) 3 (Shyu y Hwang, 2001) 4 (Liu-Ping *et al.*, 2005a; Liu-ping *et al.*, 2006)

A continuación se describe el efecto de la aplicación o no de un pretratamiento, o bien de la combinación de varios de ellos, sobre las características de calidad del producto.

#### 1.2.4.2. Color

Como ya se mencionó, uno de los objetivos de la fritura al vacío es mejorar el color de los alimentos por la baja temperatura y el bajo contenido de oxígeno. Así, al comparar el color de *chips* de patatas procesadas a presión atmosférica con las procesadas al vacío, Garayo y Moreira (2002) observaron que estas últimas eran significativamente menos oscuras que las procesadas a presión atmosférica.

Fritura al vacío

El escaldado es uno de los métodos más utilizados para evitar el pardeamiento, tanto en fritura al vacío (Liu-Ping *et al.*, 2005b; Shyu *et al.*, 2005; Shyu y Hwang, 2001) como convencional, con el fin de lixiviar azúcares solubles (Krokida *et al.*, 2001).

En cuanto a la influencia de las condiciones de proceso, Liu-Ping *et al.* (2005b) no encontraron diferencias significativas en el color de *chips* de zanahoria en función del grado de vacío (entre 0,095 y 0,06 MPa) y la temperatura (60, 80 y 100°C). Shyu *et al.* (2005), por el contrario, observaron que el color de *chips* de zanahoria disminuía conforme aumentaban el tiempo (entre 5 y 30 min) y la temperatura (entre 70 y 100°C). Sin embargo observaron que a 110°C los cambios de color se hacían evidentes, hecho atribuible a la inestabilidad de los carotenoides a partir de 100°C. Resultados similares encontraron Shyu y Hwang (2001) al procesar *chips* de manzana entre 90 y 110°C y entre 5 y 30 min de tiempo.

Respecto a la concentración de la solución azucarada, estos mismos autores observaron que las láminas que fueron inmersas en soluciones más concentradas presentaban una mayor tendencia a oscurecerse si durante la fritura se incrementaba la temperatura.

#### **1.2.4.3. Textura y microestructura.**

Garayo y Moreira (2002) observaron que los *chips* de patatas procesadas al vacío presentan mayor contracción que los procesados a presión atmosférica. Esto parece indicar que a presión atmosférica la costra se forma más fácilmente y evita una mayor contracción de la rodaja de patata. Estos autores observaron que la rapidez con la que se forma la costra influye en el aspecto superficial, por cuanto las láminas de patatas procesadas a presión atmosférica presentan una menor cantidad de poros y más grandes, en cambio las procesadas al vacío presentan lo

opuesto. Esto es consecuencia de que a presiones reducidas el agua del alimento empieza a evaporarse inmediatamente después de introducirlo en el aceite caliente. Así, el vapor formado dentro de los poros del alimento sale sin dificultad, por cuanto no se ha formado la costra y encuentra menos resistencia para salir. En cambio, cuando se procesa a presión atmosférica la costra empieza a formarse antes de que vaporice el agua que se encuentra dentro de los poros del alimento, y ésta costra presenta una mayor resistencia a la salida del vapor al exterior.

Al observar al microscopio electrónico las láminas de manzana y zanahoria fritas al vacío después de aplicar uno de los pretratamientos indicados en la tabla 1.2.4.1, Shyu y Hwang (2001) y Shyu *et al.* (2005) apreciaron que las láminas sometidas a escaldado exclusivamente presentaban una estructura menos uniforme y más contraída que las láminas a las que se les aplicó inmersión en solución azucarada. Las láminas que se sometieron a inmersión y se congelaron por lo menos durante 12 horas antes de ser procesadas, son las que mejor conservaron su estructura. Este comportamiento podría atribuirse a que cuando se han congelado las láminas la transferencia de materia entre las células se ve favorecida por los cambios que ésta produce (Saguy y Pinthus, 1995). Si además antes de congelar las láminas se someten a inmersión en solución azucarada, tiene lugar una deshidratación osmótica previa, eliminando una parte del agua e ingresando solutos al interior de la manzana que ayudan a mantener la estructura (Eshtiaghi *et al.*, 1994).

La determinación de la fuerza de ruptura es una medida de cuán crujiente es el *chip*, de forma que valores bajos de fuerza de ruptura indican un valor alto de este atributo de textura (Liu-Ping *et al.*, 2005b). En todos los trabajos estudiados sobre fritura al vacío se ha observado que al aumentar la temperatura del aceite disminuye el valor de la fuerza de ruptura, de la misma manera que cuando se aumenta el nivel de vacío, si bien estos factores no influyen de forma significativa (Garayo y Moreira, 2002).

Fritura al vacío

Respecto a la concentración de la solución azucarada utilizada en el pretratamiento influye considerablemente en la textura final del producto (Shyu *et al.*, 2005; Shyu y Hwang, 2001), es decir, al aumentar la concentración de la solución azucarada el valor de la fuerza de ruptura aumenta, pero si la temperatura de fritura se incrementa este valor disminuye. Se aprecia que existe una interacción significativa entre estos dos parámetros por lo que, igual que para el color, se debe conseguir un óptimo de combinación de concentración de azúcar y de temperatura de fritura donde se obtengan valores bajos de fuerza de ruptura.

#### **1.2.4.4. Postratamiento**

La finalidad del tratamiento posterior es disminuir el contenido de aceite en la superficie del producto frito. El tratamiento utilizado generalmente es la centrifugación (Liu-Ping *et al.*, 2005b; Shyu *et al.*, 2005; Shyu y Hwang, 2001), por cuanto la mayor cantidad de aceite que puede ingresar al alimento se produce en el momento del enfriamiento del mismo tras la fritura y al restablecer la presión atmosférica (Garayo y Moreira, 2002). También se pueden utilizar los pretratamientos para disminuir la cantidad de aceite en el producto final. Así, el pretratamiento de inmersión en solución azucarada afecta al contenido final de aceite presente en los *chips* procesados por fritura al vacío. El contenido de aceite disminuye si se incrementa el valor de la concentración de dicha solución, esto ocurre por cuanto los espacios de los poros que ocupaba el agua antes de la fritura son utilizados en parte por el soluto de la solución azucarada (Liu-Ping *et al.*, 2005b; Shyu *et al.*, 2005).

#### 1.2.4.5. Reducción de acrilamida

Desde que en abril de 2002 investigadores suecos indicaron la presencia de acrilamidas en alimentos, especialmente en aquellos con un alto contenido de carbohidratos y procesados a altas temperaturas, ya sea por horneado o por fritura, se inició un nuevo frente de investigación para determinar las causas de esta presencia y la manera de medir su contenido. Ese mismo año Ahn *et al.* (2002) confirman de forma independiente los hallazgos de los investigadores suecos, preparando los mismos alimentos y usando dos métodos de determinación de acrilamida. Además, sugieren que se puede disminuir el contenido final de acrilamida si se modifica la forma de preparación y de producción de dichos alimentos.

Gertz y Klostermann (2004) afirman que todavía no se conoce completamente los mecanismos que favorecen la formación de acrilamida en alimentos fritos, por lo que es necesario enfocar las investigaciones a las transformaciones que pueden ocurrir en el interior del alimento causadas por las transferencias de calor y materia que suceden durante el proceso, así como por la influencia de la actividad de agua, temperatura y presión en la fritura. Estos parámetros son también decisivos en el desarrollo de la reacción de Maillard, de la cual también se desconocen muchos aspectos. Recomiendan enfáticamente que en la fritura la temperatura del aceite no sobrepase los 175°C.

Además de la disminución de la temperatura de fritura, se han propuesto otros métodos para reducir la formación de acrilamida entre los que destaca el escaldado (Gertz y Klostermann, 2004; Pedreschi *et al.*, 2005b), por su acción inhibidora de la reacción de Maillard, ya que existe una correlación lineal entre el pardeamiento no enzimático y el contenido en acrilamida.

Granda *et al.* (2004), Granda y Moreira (2005) tras comparar el contenido final de acrilamida presente en *chips* de patatas procesadas con fritura al vacío y fritura

## Fritura al vacío

tradicional, afirman que la disminución de la acrilamida en este alimento está relacionada con el tipo de variedad utilizada y con la reducción de las condiciones de fritura aplicadas. En este producto, si se reduce la temperatura de 180°C a 165°C en la fritura tradicional y de 140°C a 125°C en la fritura al vacío, el porcentaje de reducción de acrilamida es del 51% y del 63% respectivamente. La reducción del contenido de acrilamida que consiguen con las condiciones de fritura al vacío es del orden del 90% respecto a la fritura tradicional.

### 1.2.5. EQUIPOS

Para la aplicación de la fritura al vacío es necesario modificar el sistema de fritura tradicional porque se tiene que enclaustrar al equipo de fritura, propiamente dicho, en otra estructura que permita hacer vacío mientras se realiza el proceso de fritura, esto es, mientras dura la inmersión del alimento en el aceite o grasa caliente.

Tecnológicamente la parte crítica se encuentra en mantener la presión reducida durante la fritura, para ello se instala todo un sistema completo donde principalmente se encuentran las siguientes unidades: la freidora en un ambiente cerrado, unidad generadora de vacío, condensadores de vapor de agua y centrífuga. El tamaño de los equipos varía dependiendo de la capacidad de producción y si el proceso es continuo o por lotes.

### 1.3. MODELADO DE LA FRITURA

La modelización matemática de procesos constituye una herramienta básica en los nuevos sistemas de producción ya que permite estimar previamente cuál va a ser el desarrollo del proceso y, en consecuencia, la posterior optimización y control integral del mismo (Banga *et al.*, 2003; Banga y Singh, 1994), permitiendo asimismo el control de la calidad del producto final. La modelización de procesos se hace especialmente difícil cuando se trabaja con productos biológicos, dado su carácter heterogéneo, complejo y delicado (Chou y Chua, 2001).

Los modelos matemáticos se utilizan en el diseño y optimización de los procesos industriales, permitiendo una mejor comprensión de los mismos y por lo tanto una mayor eficacia de los procesos productivos. La principal desventaja de los modelos matemáticos es que al formularlos es necesario realizar una serie de simplificaciones (Mulet, 1994). Por lo tanto la complejidad del modelo se debe adecuar a los objetivos que se pretenden alcanzar.

Con el fin de controlar la calidad final del producto frito, es importante entender el proceso complejo que ocurre durante la fritura. Hay que tener en cuenta que el principal objetivo de la fritura por inmersión es la remoción parcial o completa del agua y un cocimiento de la superficie del alimento, ya que la absorción de grasa se producirá en los poros creados por el vapor liberado justo cuando el producto se extraiga del medio de fritura y empiece la etapa de enfriamiento del producto. Por esta razón, la predicción de la pérdida de humedad es el aspecto más importante para modelar y controlar el proceso (Costa y Oliveira, 1999).

En la modelización de cualquier proceso, y por tanto de la fritura, se pueden distinguir los siguientes puntos:

## Fritura al vacío

- i. Identificación de resistencias controlantes. En primer lugar se debe identificar si la velocidad del proceso está controlada por la transferencia de calor o por la de materia. Cuando ambas resistencias sean significativas, el modelo deberá incluir ecuaciones que consideren la transferencia simultánea. Si se asume que la velocidad del proceso está controlada por el proceso de transferencia de materia, también hay que especificar si la resistencia controlante de este proceso se localiza en la fase externa (resistencia externa) o en el interior del sólido (resistencia interna).
- ii. Selección del mecanismo de transferencia de materia. Existen diferentes teorías que intentan explicar el movimiento del agua en el interior del sólido. De entre ellas, la más frecuentemente utilizada para la modelización del proceso es la teoría difusional (Mulet, 1994). Además de estas teorías mecanicistas que intentan explicar el movimiento del agua utilizando leyes físicas, también se pueden utilizar modelos empíricos sin ningún tipo de fundamento físico. Los modelos empíricos no buscan explicar el proceso, su único objetivo es su descripción y la identificación de las variables más relevantes (Mulet, 1994). La investigación académica debe evitar este tipo de aproximaciones cuando sea posible, pero los modelos empíricos pueden ser muy útiles para aplicaciones industriales o para simplificar fenómenos complejos (Blasco *et al.*, 2006).
- iii. Una vez seleccionada la teoría que se utilizará para describir el proceso de secado, el siguiente paso es la obtención de las ecuaciones matemáticas que describirán el proceso. Durante la obtención de las ecuaciones matemáticas representativas del proceso, frecuentemente se asumen una serie de hipótesis que pueden estar relacionadas con la homogeneidad e isotropía del sólido o con sus variaciones de volumen durante el secado.

- iv. Determinación de las propiedades del material. En los modelos aparecen propiedades inherentes de los materiales que deben ser identificadas de forma experimental. Entre ellas destacan las propiedades físicas y las estructurales (Farkas *et al.*, 1996b; Moreira, 2001).
- v. Resolución de las ecuaciones matemáticas. El grado de complejidad de la resolución del modelo difusional planteado depende en gran medida del conjunto de condiciones de contorno asumidas. En función del objetivo de la modelización se pueden plantear modelos con diferentes grados de complejidad en la resolución, lo que permite evaluar el esfuerzo requerido en la modelización y realizar la selección del modelo oportuno teniendo en cuenta este factor. Según las ecuaciones planteadas se podrán utilizar métodos de resolución analíticos, como el método de separación de variables (Crank, 1975), o, por el contrario, en algunas ocasiones hay que recurrir a métodos de resolución numéricos como el de diferencias finitas (Simal *et al.*, 1998a) o de elementos finitos (Ngadi *et al.*, 1997).
- vi. Validación del modelo. Una vez resuelto el modelo, es necesaria su validación de cara a mostrar su fiabilidad. Una manera de validar el modelo es extrapolar los resultados obtenidos a otras condiciones experimentales y ver la capacidad de ajuste del modelo en dichas condiciones (Bon *et al.*, 1997; Moreira, 2001).

En la literatura es escaso el número de trabajos de modelización de la operación de deshidratación por fritura a presión reducida o al vacío. Mayormente se encuentran trabajos aplicados a describir la transferencia de humedad en fritura a presión atmosférica. Entre éstos hay que señalar aquellos que aplican modelos empíricos, junto a los que aplican teorías aceptadas en otros procesos de deshidratación, principalmente modelos difusionales con distinto grado de complejidad. Otro tipo de modelos utilizados son los que consideran un frente de

Fritura al vacío

recesión o de frontera móvil en la interfase costra/centro (Farid, 2001; Farkas *et al.*, 1996a; Smith y Farid, 2004; Tangduangdee *et al.*, 2003) o bien los que consideran un medio poroso multifase considerando el encogimiento y la variación de volumen del producto (Yamsaengsung y Moreira, 2002a).

A continuación se realiza una revisión de los modelos más utilizados en la bibliografía.

### 1.3.1. MODELOS EMPÍRICOS.

Los modelos empíricos no pretenden describir cómo tiene lugar el proceso y sólo interpretan de forma empírica los datos. Estos modelos son útiles con fines de diseño, especialmente cuando los problemas a resolver son excesivamente complicados (Mulet, 1994). En el caso de la fritura se han propuesto diversos modelos empíricos para describir tanto la absorción de aceite como la pérdida de agua. A continuación se describen algunos de estos modelos.

Gamble *et al.* (1987) estudiaron la relación que existe entre la pérdida de humedad y absorción de aceite en función de la temperatura del aceite para fritura de láminas de patatas (*chips*). Para ello relacionaron los valores de contenido de humedad y de contenido de aceite a cada una de las temperaturas ensayadas con la raíz cuadrada del tiempo de fritura (Ecuación 1.3.1.1) suponiendo una relación lineal:

$$X = a - b.t^{1/2} \qquad \text{Ec. 1.3.1.1.}$$

Donde X es el contenido de humedad [g/100g bh], t es tiempo de fritura [s] y a, b son constantes.

A partir del coeficiente de correlación de estas relaciones lineales concluyeron que tanto la humedad como el contenido de aceite estaban correlacionados con la raíz cuadrada del tiempo de fritura.

Baumann y Escher (1995) propusieron para la descripción de la deshidratación un modelo exponencial del tipo:

$$W = a \exp^{-bt} \quad \text{Ec. 1.3.1.2}$$

Donde  $W$  es la humedad [kg/kg, bs],  $t$  es el tiempo de fritura [s] y  $a$ ,  $b$  son constantes.

Costa y Oliveira (1999) propusieron un modelo dinámico compartimental donde consideraron la transferencia de materia en los bordes y en el centro del producto. Este modelo está basado en una ecuación diferencial general de primer orden y consideran que al sumergir el alimento en el aceite, el efecto no empieza instantáneamente sino que se desarrolla exponencialmente con el tiempo según la ecuación:

$$\tau \frac{\partial X}{\partial t} + X = X_0 e^{-\beta t} \quad \text{Ec. 1.3.1.3}$$

Reordenando términos, para un compartimento cualquiera resulta:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -k(X - X_0 e^{-\beta t}) \quad \text{Ec. 1.3.1.4}$$

En esta ecuación se aprecia que el gradiente de humedad es dependiente del tiempo y que a tiempo cero este gradiente es cero. Integrando la ecuación anterior:

Fritura al vacío

$$X = X_0 e^{-kt} + \frac{X_0 k}{\beta - k} (e^{-kt} - e^{-\beta t}) \quad \text{Ec. 1.3.1.5}$$

Si se considera que no existe interacción entre los dos compartimientos, la cantidad de agua a un tiempo  $t$  es la suma de las cantidades de agua en cada uno de los compartimientos. Ajustaron los datos experimentales a la ecuación y determinaron que los valores de  $k$  y  $\beta$  no son diferentes estadísticamente para un compartimiento dado, con lo que obtienen la siguiente ecuación:

$$\frac{X}{X_0} = \alpha (e^{-K_c t} + (1 + K_c t)) + (1 - \alpha) (e^{-K_e t} + (1 + K_e t)) \quad \text{Ec. 1.3.1.6}$$

Donde:  $X$  = humedad [g/100g bh] al tiempo  $t$ ,  $X_0$  = la humedad inicial,  $\beta$  = constante de retraso,  $\tau$  = constante de tiempo del compartimiento,  $k$  = constante de relación (reciproca de  $\tau$ ),  $\alpha$  = fracción inicial de agua del compartimiento interno (*core*),  $c$  = compartimiento interno (*core*),  $e$  = compartimiento externo o borde (*edge*)

Krokida *et al.* (2000) relacionaron la pérdida de agua y la absorción de aceite en función del tiempo de fritura y aplicaron una ecuación cinética de primer orden para modelizar este proceso.

Al plantear el modelo matemático (Ecuación 1.3.1.7) asumieron las siguientes condiciones iniciales: la temperatura del aceite permanece constante; la concentración inicial de agua es uniforme en el producto; en el alimento el flujo de agua es independiente del flujo de aceite. A tiempo cero la humedad es  $X_0$  y el contenido de aceite es nulo. La determinación de sus parámetros se realizó aplicando una regresión no lineal.

Para la humedad:

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = e^{-(K_x t)} \quad \text{Ec. 1.3.1.7}$$

Donde:  $W$  = contenido de agua [kg/kg bs], al tiempo  $t$ ;  $W_e$  = contenido de agua [kg/kg bs], 10 en el equilibrio,  $W_0$  = contenido de agua inicial [kg/kg bs],  $K_x$ =constante de relación de pérdida de agua [ $\text{min}^{-1}$ ]

### 1.3.2. MODELOS DIFUSIONALES

La teoría difusional fue desarrollada por Lewis (1921) y posteriormente por Sherwood (1929). Los modelos difusionales son fáciles de formular y normalmente proporcionan resultados razonables. Su principal inconveniente recae frecuentemente en las suposiciones que se tienen en cuenta para poder resolverlo. Generalmente, se asume una difusividad efectiva que incluye los efectos relacionados con la cinética, tanto los conocidos como los fenómenos desconocidos (Mulet, 1994).

A partir de la ley de Fick, y realizando un balance microscópico de materia en un volumen de control, se obtiene la ecuación de gobierno del problema de transferencia de materia (Simal *et al.*, 1998a). La ecuación 1.3.2.1 muestra la ecuación de gobierno para una geometría de lámina infinita, donde para describir la evolución de la humedad en un punto del sólido,  $W$  [ $\text{kg kg}^{-1}$  bs], se supone que el material es homogéneo e isotrópico y que la difusividad efectiva,  $D_{\text{eff}}$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] es constante:

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} \right) \quad \text{Ec. 1.3.2.1}$$

Donde  $x$  representa la distancia desde el plano de simetría en la dirección característica de la geometría de lámina infinita.

## Fritura al vacío

La ecuación 1.3.2.1 se puede resolver analíticamente utilizando el método de separación de variables (Crank, 1975) cuando se considera que el volumen y el coeficiente de difusión de la muestra permanecen constantes durante el proceso, que la humedad crítica de la muestra es su humedad inicial, que la humedad en la superficie es la que corresponde al equilibrio con el medio, y se expresa la concentración de humedad de forma adimensional ( $\Psi$ ). Integrando para el volumen considerado se obtienen valores promedio en el producto (Ec. 1.3.2.3)

$$\Psi = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} \quad \text{Ec. 1.3.2.2}$$

$$\Psi = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{\text{eff}} t}{4l^2}\right] \quad \text{Ec. 1.3.2.3}$$

Donde:  $W$  es la humedad [ $\text{kg kg}^{-1}$  bs] al tiempo  $t$  [s],  $W_0$  es la humedad crítica que se considera igual a la humedad inicial,  $W_e$  es la humedad en el equilibrio y  $l$  es el semiespesor de la lámina [m].

Como se dijo anteriormente, los procesos de fritura por inmersión y de secado son muy similares, por lo cual las ecuaciones básicas que gobiernan la transferencia de masa y energía son las mismas. Las diferencias entre los modelos radican usualmente en el sistema que el modelo describe. En cada caso las hipótesis a realizar, las condiciones de contorno, los mecanismos de transporte y las propiedades físicas para cada sistema pueden variar. En la bibliografía se encuentran aplicaciones del modelo difusivo en la fritura con diferente grado de complejidad.

Math *et al.*, (2004) y Budzaki y Seruga (2005) para describir el mecanismo de transporte del agua que ocurre en el proceso de fritura determinaron el coeficiente de difusividad, para lo cual consideraron que el espesor de una lámina de alimento es significativamente menor que el diámetro de la misma, y utilizaron la resolución

de la ley de Fick para una geometría de lámina infinita (ecuación 1.3.2.3) considerando  $D_{\text{eff}}$  constante. Dichos autores supusieron que la humedad en el equilibrio es cero y consideraron un solo término del desarrollo de la serie obteniendo:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4 l^2}\right) \quad \text{Ec. 1.3.2.4}$$

Reorganizando los términos obtuvieron la siguiente ecuación:

$$-\ln\left(\frac{\pi^2 W}{8 W_0}\right) = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4 l^2} \quad \text{Ec. 1.3.2.5}$$

El efecto de la temperatura en el coeficiente de difusión, es descrito utilizando una relación tipo Arrhenius:

$$D_{\text{eff}} = D_0 e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad \text{Ec. 1.3.2.6}$$

Donde  $E_a$  es la energía de activación [ $\text{kJ mol}^{-1}$ ],  $R$  es la constante universal de los gases [ $8.314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ],  $T$  es la temperatura absoluta [K] y  $D_0$  es el factor pre-exponencial [ $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ].

Moreira *et al.* (1995), aplicaron un modelo difusional para describir el proceso de fritura de tortillas de harina de maíz. Dado que el espesor de la tortilla es pequeño comparado con las otras dimensiones, supusieron que equivale a una geometría de lámina infinita; por lo tanto, el modelo de transferencia de calor y de materia deriva en ecuaciones unidimensionales como la ecuación 1.3.2.1. Además supusieron que la humedad y temperatura inicial eran uniformes en todo el alimento; el encogimiento despreciable; las difusividades térmica y de humedad permanecen constantes; y que el aceite penetraba en el alimento espontáneamente durante el enfriamiento.

## Fritura al vacío

El sistema de ecuaciones diferenciales parciales en las dimensiones de espacio y tiempo lo resolvieron numéricamente con el método de diferencias finitas explícitas, para lo cual el espesor de la tortilla fue dividido en 10 nodos.

En un trabajo posterior, Moreira (2001) consideró que la difusión es el principal mecanismo de transferencia de agua durante el proceso de fritura, asimismo que la difusividad es constante y resolvió el modelo propuesto aplicando la técnica de diferencias finitas.

Mittal y Zhang (2000; 2001) supusieron que la difusión es constante y las ecuaciones propuestas las resolvieron aplicando el desarrollo de una red neuronal.

Moyano y Berna (2002) modelaron la pérdida de agua durante la fritura de patatas cortadas en tiras, para lo cual propusieron utilizar la resolución de la segunda ley de Fick suponiendo que la geometría de las tiras de patatas es el resultado de la multiplicación de tres láminas infinitas.

Estos autores resolvieron la ecuación de dos maneras, suponiendo que la difusividad es constante durante todo el proceso y suponiendo que varía con el tiempo de fritura según una relación del tipo:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \left( 1 + \frac{D_0}{l^2} t \right)^b \quad \text{Ec. 1.3.2.7}$$

Donde  $D_0$  es la difusividad efectiva al tiempo cero, y  $b$  es un parámetro adimensional. Para esta geometría la consideración del  $D_{\text{eff}}$  variable presentó un mejor ajuste de los resultados.

Pedreschi *et al.* (2005a) modelaron la pérdida de agua durante la fritura de láminas de patatas siguiendo las mismas ecuaciones propuestas en el trabajo de Moyano y Berna (2002) y de la misma forma obtuvieron similares conclusiones.

Ngadi *et al.* (1997) consideraron que la difusividad variaba en función de la humedad y de la temperatura y resolvieron el modelo por el método de los elementos finitos.

Baik y Mittal (2005) modelaron la transferencia de humedad y de calor en la fritura de láminas de tofu. Estos autores consideraron que la difusividad variaba en función de la humedad y temperatura del producto y resolvieron simultáneamente las ecuaciones de difusión de calor y materia basándose en la técnica de las diferencias finitas.

### 1.3.3. MODELOS DE FRENTE DE RECESIÓN

En los modelos de frente de recesión o frontera móvil se considera la existencia de una interfase móvil agua-vapor de agua. En este tipo de modelos, por la formación de la corteza en el alimento frito, se considera que la fritura debe ser estudiada de manera similar a otros procesos tales como la congelación de agua, fusión del hielo, fusión de metales, donde se observa la existencia de una interfase móvil durante el proceso (Singh, 2000).

Entre los trabajos que han utilizado este tipo de modelos destacan los de Farkas *et al.* (1996a). Dichos autores desarrollaron un sistema de ecuaciones matemáticas para modelar la transferencia de calor y de masa en el proceso de fritura por inmersión, siendo el objetivo de su estudio predecir perfiles de humedad y temperatura, y el espesor de la corteza que se va formando durante la fritura de un sistema alimenticio.

Para realizar su estudio utilizaron un alimento homogéneo e isotrópico, que por su forma y tamaño se consideró como una lámina infinita.

## Fritura al vacío

Además asumieron las siguientes suposiciones: la composición inicial de la región interna estaba compuesta de agua líquida, material sólido y una cantidad insignificante de gas; en cambio, la región correspondiente a la corteza estaba compuesta de vapor de agua, aceite, material sólido y una cantidad insignificante de agua líquida, que la energía se transmitía principalmente por conducción y convección; y que la cantidad de aceite que ingresaba al alimento es despreciable. Todos los flujos de masa y energía eran perpendiculares a la superficie del material y las propiedades de éste cambiaban sólo en esa dirección.

El flujo del agua líquida lo modelaron y resolvieron usando la teoría de difusión y considerando que la difusividad es constante. Especificaron 8 condiciones límite o de contorno y tres condiciones iniciales. La resolución numérica del modelo matemático la realizaron inmovilizando el movimiento de la frontera móvil usando una transformación de las coordenadas y el método implícito de diferencias finitas de Cranck Nicolson para convertir las ecuaciones diferenciales parciales en un grupo de ecuaciones algebraicas no lineales.

Para la validación del modelo matemático con datos experimentales procesaron un producto rehidratado de una mezcla de patata. De esta forma se evitaron las variaciones inherentes a los productos no homogéneos y además disponían de datos sobre las propiedades físicas y térmicas de este producto (Farkas *et al.*, 1996b). La validez del modelo matemático se confirmó por una buena correlación entre los datos experimentales y los simulados.

Farid y Chen (1998) desarrollaron un modelo matemático basándose en la teoría y experiencias de la solidificación y fusión de materiales. Para describir la transferencia de calor durante la fritura consideraron dos zonas en el producto separadas por una interfase y resolvieron el modelo resultante por el método de las diferencias finitas. De esta manera el tiempo de cálculo para encontrar las soluciones a las ecuaciones diferenciales parciales propuestas fue menor que el requerido por el modelo de Farkas *et al.* (1996b).

Tangduangdee *et al.* (2003) aplicaron este modelo para describir la transferencia de materia en la fritura de alimentos compuestos. En cambio, Farid (2001; 2002) y Smith y Farid (2004) buscaron optimizar este modelo en su aplicación al proceso de fritura.

#### 1.3.4. MODELOS QUE CONSIDERAN LA ESTRUCTURA

Para tomar en cuenta los cambios físicos del alimento, Yamsaensung y Moreira (2002a) correlacionaron el cambio estructural con los fenómenos de transferencia de masa y calor que ocurre en el proceso de fritura de *chips* de tortilla y en el de enfriamiento después de la fritura. Para ello consideraron que el material es higroscópico y consta de seis fases: agua líquida y ligada, vapor, aire, aceite y la matriz sólida. Desarrollaron un modelo de medio poroso multifase, considerando la variación del volumen del producto, basándose en las ecuaciones de transporte de masa y de energía para dicho medio. Además, para cuantificar el cambio estructural utilizaron correlaciones semiempíricas.

Las relaciones parten de las definiciones de porosidad y de saturación, y que durante la fritura de un medio poroso, el transporte de materia ocurre por la difusión del vapor y del aire, por capilaridad del líquido (agua y aceite), por diferencia de presión de líquido, vapor y aire.

El modelo matemático propuesto para describir la transferencia de masa durante la fritura es un complejo grupo de ecuaciones diferenciales parciales, no lineales. Para resolver este grupo de ecuaciones diferenciales parciales aplicaron la técnica de los elementos finitos.

Yamsaensung y Moreira (2002b) presentaron gráficos de los perfiles de saturación de humedad, de aceite y temperatura durante la fritura, en los que se

Fritura al vacío

aprecia que existe una buena correlación entre los datos experimentales y los simulados. Tras el análisis de sensibilidad concluyeron que cuando la temperatura del aceite es alta, el secado fue más rápido, además la temperatura y presión del producto aumentaron rápidamente.

### 1.3.5. MODELIZACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE ACEITE

Como se mencionó anteriormente en el proceso de fritura existen dos fenómenos importantes, la pérdida de agua del producto y el ingreso de aceite en el mismo. Sin embargo en la literatura no se aborda la modelización de la ganancia de aceite con la misma intensidad que la pérdida de agua. Existe concordancia en que la absorción de aceite se realiza, principalmente, en la etapa de enfriamiento después que se ha retirado la muestra del aceite.

La modelización de la absorción de aceite, la mayoría de autores lo realizan conjuntamente con la modelización de la pérdida de agua, para lo cual utilizan métodos similares.

Es decir aplican métodos empíricos, así, Gamble et al. (1987) relacionaron la absorción de aceite en función de la raíz cuadrada del tiempo de fritura (ecuación 1.3.1.1). Moreira *et al.* (1995), Krokida *et al.* (2000), Budzaki y Seruga (2005) consideraron la absorción de aceite en función del tiempo de fritura y aplicaron una ecuación cinética de primer orden para modelizar este proceso.

$$Y = Y_e \left[ 1 - e^{(-K_Y t)} \right] \quad \text{Ec. 1.3.5.1}$$

Donde:  $Y$  = contenido de aceite [kg/kg bs] al tiempo  $t$ ,  $Y_e$  = contenido de aceite [kg/kg bs] en el equilibrio o máximo contenido,  $K_Y$  = constante de relación de absorción de aceite [ $\text{min}^{-1}$ ]

Moyano y Pedreschi (2006) consideraron dos tipos de modelos empíricos, uno según la cinética de primer orden (ecuación 1.3.5.1) y otro a partir de la ecuación 1.3.5.2.

$$Y = \frac{Y_{eq} k_Y t}{1 + k_Y t} \quad \text{Ec. 1.3.5.2}$$

Los resultados mostraron que existe un buen ajuste entre los valores experimentales y los simulados para el contenido de aceite. Sin embargo para Moyano y Pedreschi (2006) la ecuación 1.3.5.2 ajusta mejor los datos para el máximo contenido de aceite.

Chen y Moreira (1997) aplicaron un modelo difusivo para *chips* de tortilla e indicaron que la difusión del aceite en el producto fue muy baja durante el proceso de fritura.

Para describir la absorción de aceite durante el enfriamiento luego del proceso de fritura, Bouchon y Pyle (2005) utilizaron un modelo basado en las fuerzas capilares y las diferencias de presión.

Por lo expuesto anteriormente, se aprecia en la literatura encontrada sobre fritura a presión atmosférica (fritura convencional) y fritura a presión subatmosférica (fritura al vacío) varios aspectos a tener en cuenta:

- La descripción básica del proceso de transferencia de calor y de materia es prácticamente similar para los dos procesos.
- La mayoría de autores consideran que es la difusión el principal mecanismo de transferencia de la humedad dentro del alimento.

## Fritura al vacío

- Que es creciente el interés por describir y entender el proceso de fritura, de igual manera el desarrollo de modelos matemáticos que permitan optimizar los procesos.
- En cambio, en el proceso de fritura al vacío es muy importante ampliar el conocimiento de la cinética de pérdida de agua y absorción de aceite. De igual forma utilizar la teoría de difusión para describir el proceso de transferencia de materia y modelar matemáticamente la misma.

### 1.3.6. CONCLUSIONES

De la revisión bibliográfica realizada se pueden extraer diferentes conclusiones:

- La fritura es una operación muy utilizada en el procesado de diferentes alimentos.
- El mercado de alimentos fritos es muy importante y se encuentra en un periodo de expansión.
- En el momento actual existe una preocupación creciente por la calidad de los alimentos, siendo por tanto muy importante considerar los aspectos del proceso que inciden en la misma.
- Uno de los aspectos más importantes durante el proceso de fritura es la pérdida de agua.
- Frecuentemente para explicar la pérdida de agua durante el proceso de fritura se considera que éste es similar a la deshidratación.
- La modelización matemática constituye una herramienta fundamental del análisis de procesos.

- Existen diferentes teorías para explicar la transferencia de agua en un sólido. Tanto en procesos de fritura como de deshidratación, la más frecuentemente utilizada es la teoría difusional.
- Aunque los modelos empíricos no proporcionan información útil para explicar el proceso, pueden ser de considerable interés en la práctica industrial.
- Si bien los modelos de frente de recesión pueden servir para intentar abordar el estudio de la fritura, su complejidad los hace poco útiles para aplicaciones de diseño y optimización del proceso.
- Según el objetivo perseguido se plantean diferentes tipos de modelos de complejidad variable, siendo los métodos de resolución elegidos diferentes según el modelo considerado.
- Entre los parámetros de calidad de los productos fritos cabe considerar los organolépticos y nutricionales.
- Respecto a las características organolépticas, el consumidor busca que éstas le recuerden al producto original o a determinados atributos, tales como la crocancia.
- En cuanto a los atributos nutricionales, cabe señalar la preocupación de los consumidores por el contenido en grasa de los productos fritos.
- Como respuesta a estas preocupaciones ha surgido el proceso de fritura al vacío.
- Al disminuir la presión del proceso disminuye la temperatura de ebullición, reduciéndose las pérdidas y transformaciones ligadas a las altas

## Fritura al vacío

temperaturas. De este modo se pueden obtener productos de características más similares a las de las materias primas.

- Entre las transformaciones indeseadas que se pueden evitar disminuyendo la temperatura se encuentra la formación de acrilamidas.
- Con la fritura al vacío se pueden obtener gamas de nuevos productos fritos de alto valor añadido.
- La modelización y análisis de los procesos de fritura al vacío ha sido muy poco abordada en la literatura.
- Resulta de interés el estudio de la transferencia de calor y materia en los procesos de fritura al vacío.
- En la fritura al vacío es necesario considerar tanto la transferencia de agua como de aceite debido a las preocupaciones de los consumidores respecto a este último aspecto.
- Los pretratamientos pueden constituir también una herramienta para incidir en la calidad de los productos fritos.

## 2. OBJETIVOS

Tras la revisión de las publicaciones científicas referentes a la fritura al vacío se ha observado que, actualmente la investigación del proceso de fritura al vacío cobra amplitud y, además, que está referida principalmente a encontrar las condiciones óptimas para obtener un alimento con alta calidad organoléptica. Teniendo en cuenta que todo lo referente a la transferencia de masa durante la fritura al vacío es importante para profundizar en el conocimiento del proceso, se propone el siguiente objetivo.

El objetivo principal del presente trabajo es estudiar la influencia de la temperatura y el nivel de vacío sobre la transferencia de materia durante el proceso de fritura. Concretamente este trabajo se centrará principalmente en la pérdida de agua de láminas de manzana de la variedad *Granny smith* durante la fritura al vacío, así como en la absorción de aceite en función de las condiciones de operación.

Para conseguir este objetivo principal se proponen los siguientes objetivos particulares:

- Implementar un sistema de fritura al vacío que permita realizar las experiencias necesarias.
- Determinar las cinéticas de pérdida de agua bajo diferentes condiciones de operación.

## Fritura al vacío

- Determinar el coeficiente de difusión efectivo del vapor de agua y la energía de activación, así como la influencia de las condiciones de operación sobre dichos parámetros.
- Estudiar la influencia de las condiciones de operación en la pérdida de agua y en la absorción de aceite por el producto y su relación con la microestructura del mismo.

### 3. APARATO EXPERIMENTAL

#### 3.1. DISEÑO

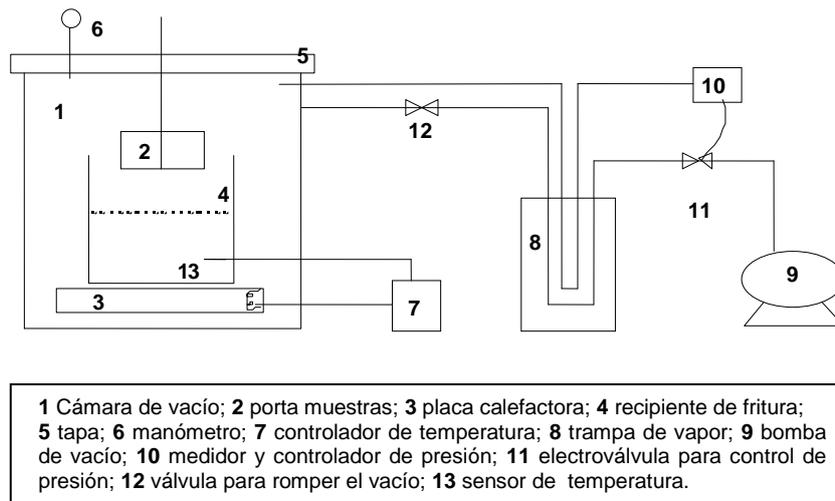
Para desarrollar la parte experimental de este trabajo fue necesario disponer de un sistema de fritura al vacío, capaz de responder a los requisitos experimentales para alcanzar los objetivos propuestos. Dado que en el mercado no se encontró oferta de equipamiento adecuado para el estudio de las cinéticas de transferencia de materia durante la fritura al vacío, se procedió a diseñar y construir un sistema que permitiese realizar este proceso y que reuniera las características que a continuación se exponen y que se traducen en capacidad para:

- establecer y controlar la presión de trabajo,
- establecer y controlar la temperatura de trabajo,
- trabajar a tiempos de fritura cortos,
- atemperar los productos a freír,
- escurrir el aceite del producto frito,
- registrar la presión de la cámara y temperatura del aceite de fritura.

Para satisfacer estas necesidades se diseñó el sistema que se muestra esquemáticamente en la figura 3.1.1. Además de la cámara de vacío donde se ubica la unidad de fritura, es necesario disponer de elementos auxiliares tales

## Fritura al vacío

como bomba de vacío, válvulas, fuentes de energía, condensadores de agua, mangueras, cronómetro, etc.



**Figura 3.1.1** Diagrama del sistema de fritura al vacío.

## 3.2. CONSTRUCCIÓN

Para la construcción del aparato experimental se definieron en primer lugar las características técnicas de los elementos. A partir de estas características se construyeron o adquirieron los diferentes elementos.

A continuación se detallan los elementos que componen del sistema de fritura. Los números de los elementos se corresponden con los de la figura 3.1.1.

## Aparato Experimental

- La cámara de vacío (1) consta de un recipiente cilíndrico de acero inoxidable de 30 L de capacidad, suficiente para poder introducir los elementos de fritura. Además, esta cámara dispone de una tapa que permite mantener el vacío y facilitar la carga y descarga del producto.
- Portamuestras (2) de malla de acero inoxidable que permite mantener las láminas completamente sumergidas en el aceite caliente, cuyo diámetro es 0.18 m y su altura es 0.08 m. Está unido a un vástago de acero inoxidable. Este vástago traspasa la tapa y permite que se accione el portamuestras, bajando y subiendo. El vástago está sujeto en la tapa con un sistema de empaques estanco al paso del aire para así mantener el vacío. El portamuestras tiene una rejilla del mismo material, que sirve como tapa para mantener las láminas de manzana sumergidas completamente en el aceite caliente y evitar que floten durante la fritura. La acción de bajar y sumergir el portamuestras en el aceite caliente, así como la de elevarla y retirarla del aceite, se realiza de forma manual, a través del vástago de acero unido al portamuestras.
- Placa calefactora (3) marca UFESA (Vitoria, España), modelo PC-7681 de 1000W, para calentar el aceite hasta la temperatura que requiera cada experiencia.
- Recipiente de fritura (4) de acero inoxidable de 10 L de capacidad, que contiene la cantidad necesaria de aceite y que permite introducir el portamuestras con las láminas de manzana. En este recipiente es donde propiamente se realiza el proceso de fritura.
- La tapa (5) que se utiliza puede ser de cristal o de aluminio. En el primer caso se usó un elemento de un desecador y en el segundo se mecanizó. El espesor de la tapa de aluminio es de 0.02 m. En ambos casos existe un

## Fritura al vacío

mecanismo que permite adaptar y accionar el portamuestras. Además a esta tapa está acoplado un manómetro mecánico (6).

- Controlador de temperatura (7), marca OMRON ('s-Hertogenbosh, Países Bajos), modelo E5CK, conectado a la placa calefactora y con un sensor de temperatura tipo Pt100 (13), introducido en el aceite. Este controlador mantiene la temperatura del aceite a la temperatura de consigna de cada experiencia por medio de un control PID (Proporcional Integral Derivado).
- Trampa de vapor (8) que consiste en dos condensadores de vidrio, ubicados entre la cámara de vacío y la bomba de vacío. La mezcla del aire y del vapor de agua producido durante la fritura pasa por los dos condensadores, que están conectados en serie y sumergidos en líquido refrigerante mezclado con hielo, para así conseguir que el vapor de agua se condense y evitar que la eficiencia de la bomba se vea afectada.
- Bomba de vacío (9) marca ABM, (Greiffenberger Antriebstechnik GmbH Marktrechwitz, Alemania), modelo 4EKF63CX-4, con la que se consigue la presión requerida para cada experiencia.
- Controlador digital de presión (10), marca SMC (Valencia, España) modelo ZSE30. Este elemento permite realizar un control todo o nada y tiene una salida analógica conectada a la electroválvula (11). En este controlador se asigna el valor de presión de trabajo de cada experiencia y su histéresis y, cuando la presión de la cámara de vacío marca el valor de consigna, envía una señal de corriente que permite cerrar la electroválvula. Asimismo, cuando la presión sube hasta alcanzar el valor asignado de histéresis, envía otra señal que permite que la electroválvula se abra y admite el paso del aire para nuevamente conseguir el vacío en la cámara. Este controlador está unido a la cámara de vacío por medio de

una manguera y entre ambos se ha colocado un condensador de vapor de agua (8) para evitar daños en su sensor de membrana.

- Electroválvula (11), marca ACL, type 201 (Caponago, Italia), ubicada entre la cámara de vacío y la bomba de vacío. La electroválvula está conectada en la manguera de conducción del aire evacuado por la bomba y permite el paso del aire cuando la señal que le llega del controlador de presión así lo indica, hasta obtener el vacío requerido en cada experiencia.
- La evacuación del aire y del vapor de agua que se retiran de la cámara de vacío se realiza a través de mangueras de plástico apropiadas para trabajar a presiones reducidas.

En el anexo 1 se presentan varias fotografías del proceso de construcción del sistema de fritura al vacío.

### **3.3. PUESTA A PUNTO Y CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL**

Después de la construcción del equipo se hicieron las pruebas pertinentes para la comprobación de estanqueidad del mismo, también pruebas para determinar la estabilidad de la presión y de la temperatura durante el proceso de fritura. Primeramente se determinó la cantidad de aceite requerida para la experimentación. Para esto se consideró la capacidad del recipiente de fritura, el espacio necesario para que se pueda retirar el portamuestras del aceite al finalizar el tiempo de fritura asignado y que el aceite no se derrame al ingresar el portamuestras ni durante el tiempo que permanece éste inmerso en el aceite caliente, a consecuencia de la salida del vapor de la muestra. Tras esta

## Fritura al vacío

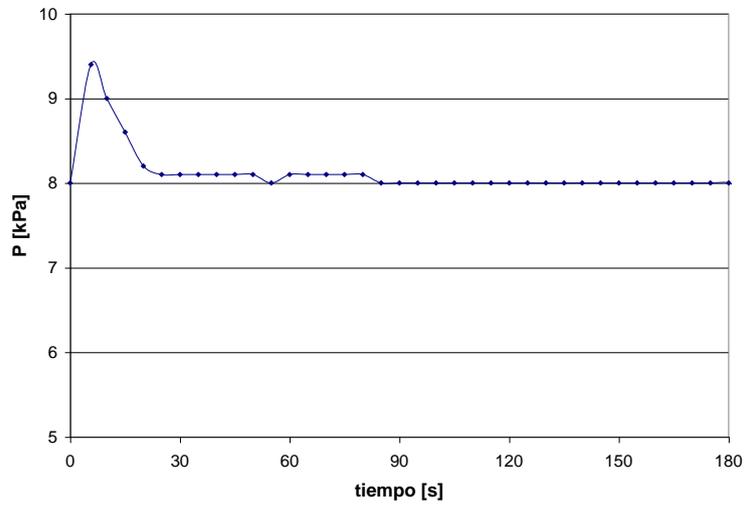
experimentación se determinó que el volumen de aceite necesario para este propósito era de 5 L.

Para caracterizar el comportamiento del sistema de vacío se procedió a realizar experiencias de fritura al vacío y registrar los valores de temperatura del aceite y de la presión en la cámara de vacío.

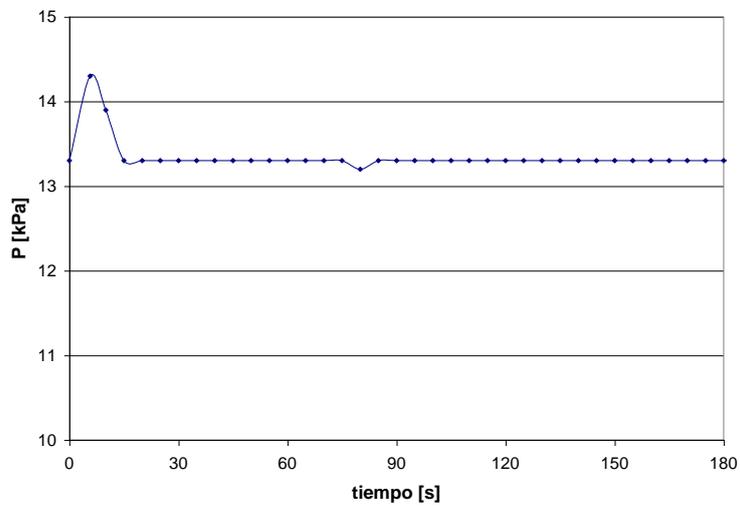
En el controlador de temperatura se realizó la determinación automática de los valores de PID para el volumen de aceite de 5 L en condiciones de experimentación, trabajando en vacío; con estos valores se consiguió configurar el controlador para que alcance la temperatura de consigna y la estabilice.

A partir de las medidas de tiempo y temperatura se determinó que el equipo aumentaba la temperatura del aceite a razón de 2.4 °C/min para una carga de 5 L de aceite en el intervalo de temperaturas de trabajo. Asimismo se observó que el equipo se demoraba 4 min en llegar al máximo nivel de vacío de trabajo (8 kPa) desde la presión atmosférica (101.3 kPa).

A modo de ejemplo, se muestra en los gráficos 3.3.1 a 3.3.7 el comportamiento de la presión y de la temperatura durante el proceso de fritura al vacío de láminas de manzana. En el anexo 2 se presentan diferentes gráficos referentes a la variación de la temperatura y presión durante la fritura al vacío

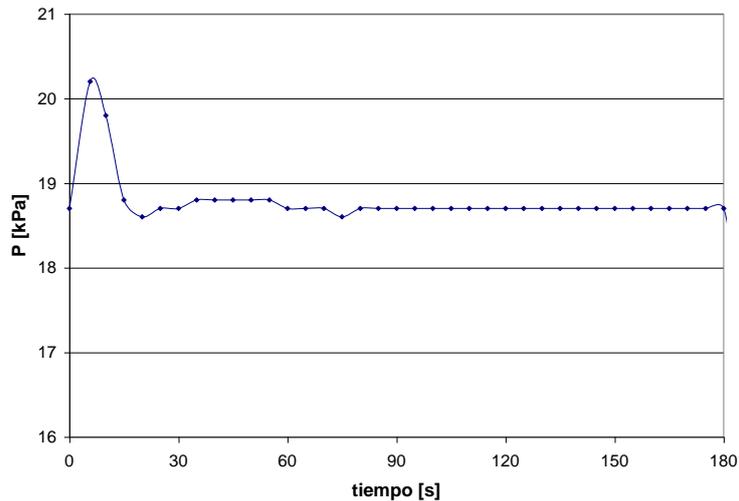


**Figura 3.3.1.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana (27 g). Consigna: P=8 kPa y T=110°C.



**Figura 3.3.2.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana (25 g). Consigna: P=13.3 kPa y T=90°C

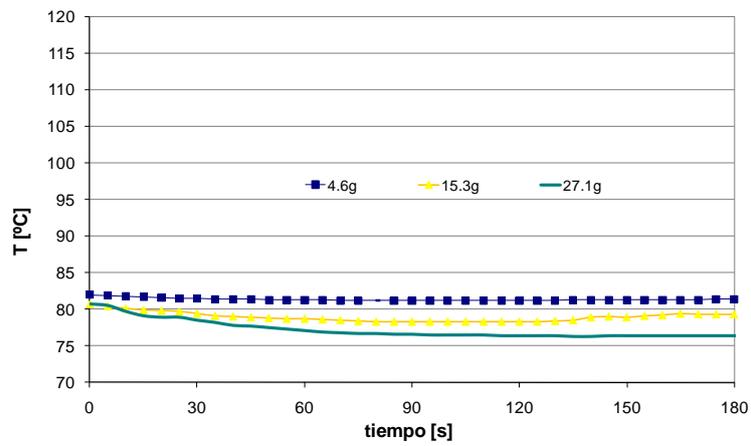
## Fritura al vacío



**Figura 3.3.3.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana (27 g). Consigna:  $P=18.6\text{kPa}$  y  $T=100^{\circ}\text{C}$ .

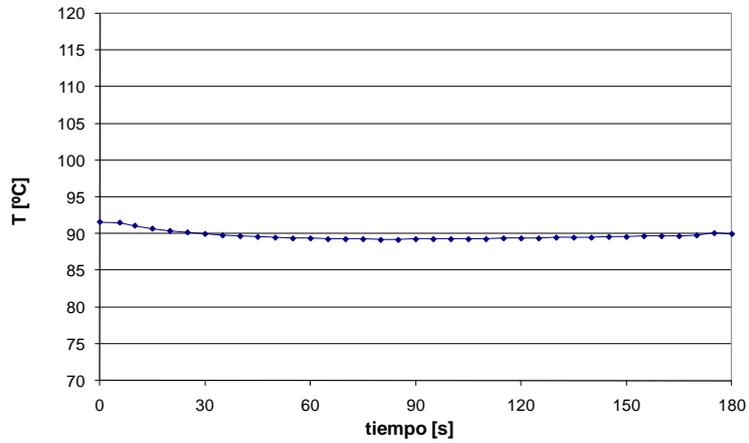
En los gráficos de la presión en función del tiempo de proceso, figuras 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3, se observa que inmediatamente después de introducir las láminas de manzana en el aceite caliente, la presión aumentaba, causando una pérdida de vacío en el sistema. Este cambio de presión es debido a la presencia del vapor de agua que empezaba a salir de las láminas de manzana y tenía que ser extraído por la bomba de vacío. El máximo de presión se produjo en menos de 10 s y a partir de este momento la presión empezó a disminuir hasta el valor de consigna, esto se consiguió en menos de 30 s. Una vez alcanzado el valor de consigna, éste se mantenía estable en un intervalo de  $\pm 0.2$  kPa (mínima resolución del controlador) durante el desarrollo de las experiencias de fritura.

Con esto se comprobó que el sistema controlador de la presión (manómetro digital, electroválvula y bomba de vacío) respondía adecuadamente a los requerimientos del sistema.

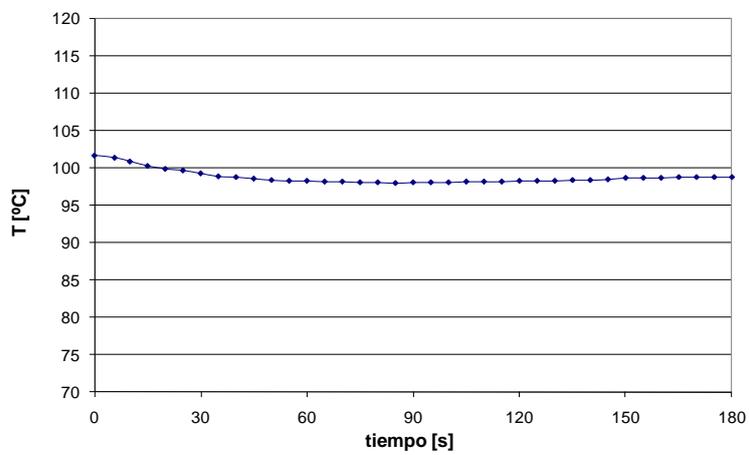


**Figura 3.3.4.** Evolución de la temperatura durante la fritura, cuando se varía el peso de manzana de 4.6 a 15.3 y a 27.1 g (1, 3 y 4 láminas respectivamente). Consigna  $T=80^{\circ}\text{C}$  y  $P= 8 \text{ Kpa}$ .

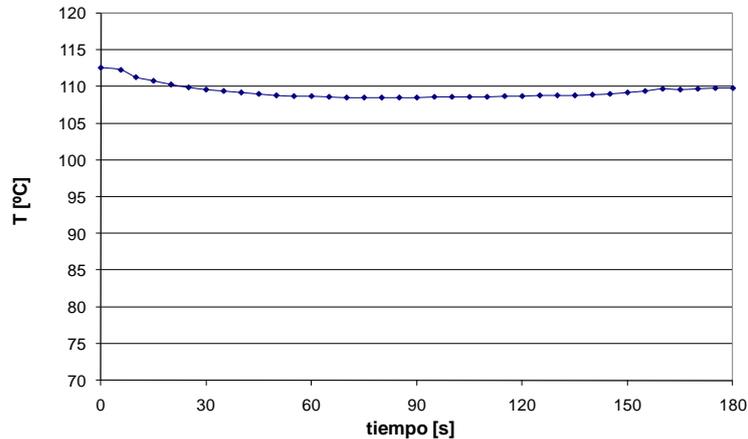
### Fritura al vacío



**Figura 3.3.5.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana (24 g). Consigna: T=90 °C y P=8 kPa.



**Figura 3.3.6.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana (27 g). Consigna: T=100°C y P=13.3 kPa.



**Figura 3.3.7.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana (27 g). Consigna:  $T=110^{\circ}\text{C}$  y  $P=18.6\text{ kPa}$ .

En la figura 3.3.4 se observa que al introducir el portamuestras con las láminas de manzana en el aceite caliente, inmediatamente, la temperatura de éste empieza a descender, siendo este descenso más acusado cuanto mayor es la carga de producto. Esto es debido a que el calor transferido desde el aceite debe permitir, evaporar el agua contenida en las láminas de manzana y calentar la masa del portamuestras. Por este motivo se decidió iniciar el proceso a una temperatura por encima del valor de la temperatura asignada a cada experiencia y conseguir que esta diferencia de temperatura del aceite permita compensar la brusca pérdida de calor inicial.

Para determinar este incremento de temperatura se consideraron dos aspectos: el calor necesario para calentar el portamuestras y el calor necesario para evaporar el agua en los primeros segundos del proceso. En este cálculo se asumió que en

## Fritura al vacío

los primeros 15 s se evapora alrededor de un 20% del agua contenida inicialmente en cuatro láminas que tienen un peso total de aproximadamente 25 g. Con los datos de las propiedades físicas del aceite y del material del portamuestras se realizó el cálculo de este descenso de temperatura, obteniéndose como resultado un valor de 2 °C.

En los gráficos de las figuras 3.3.5, 3.3.6 y 3.3.7, se observa el comportamiento de la temperatura durante la fritura de cuatro láminas de manzana. El proceso de fritura se iniciaba a una temperatura 2°C por encima de la de consigna. Al introducir el portamuestras con las láminas de manzana en el aceite caliente, inmediatamente la temperatura de éste empezaba a descender de una forma muy rápida, a los 15 s marcaba la temperatura de consigna y a los 60 s terminaba el descenso y se iniciaba el aumento de la temperatura hasta alcanzar la temperatura de consigna.

Como se puede apreciar en los gráficos anteriores, el control de la temperatura no es inmediato como en el caso de la presión. Esto es provocado por la dificultad que conlleva transferir el calor de la placa calefactora al aceite y en el seno del mismo aceite y a que la placa calefactora está desconectada al realizar la inmersión de la muestra, al estar el aceite a la temperatura de consigna.

Por lo tanto, se puede manifestar que en este sistema de fritura al vacío, la temperatura se mantiene estable en un intervalo máximo de  $\pm 2$  °C durante el tiempo de fritura, no alcanzándose, por tanto, en dicho tiempo el valor de consigna en la mayoría de los casos.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1. MATERIA PRIMA Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS**

Para la realización del trabajo experimental se utilizaron manzanas de la variedad *Granny Smith*, y aceite 100% de girasol. Los dos productos fueron adquiridos en un supermercado local (Valencia, España).

En la preparación de las muestras se utilizó una cortadora mecánica marca BRAHER modelo 300 (San Sebastián, España). Para pesar las láminas se utilizó una balanza digital marca BEL Engineering modelo Mark (Monza, Italia), y para triturar las muestras se requirió de una picadora de vegetales, marca Moulinex, modelo D56.

### **4.2. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD**

Para la caracterización de la manzana fresca y de las láminas de manzana procesadas se determinó la humedad según el método descrito en AOAC N° 934.01 (1997). Cada análisis se realizó por duplicado.

Fritura al vacío

### **4.3. DETERMINACIÓN DE LOS GRADOS BRUX**

En la caracterización de la manzana fresca, se determinaron los °Brix, por medio de un Brixómetro, marca Zuzi. Cada análisis se realizó por duplicado.

### **4.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE GRASA**

La determinación del contenido de grasa en las láminas procesadas se realizó según el método descrito en AOAC N° 920.39 (1997). Cada análisis se realizó por duplicado.

### **4.5. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO**

Para observar las muestras mediante microscopía electrónica se empleó un microscopio de barrido de baja temperatura JEOL JSM-5410. Las muestras de manzana frita se fijaron introduciéndolas en nitrógeno líquido (-210 °C), se fracturaron dentro de la cámara del microscopio y se recubrieron de oro. La superficie fracturada de las muestras se observó directamente mientras se mantuvo la temperatura a -130 °C o inferior. Se realizaron fotografías de la parte superficial y del corte transversal, tanto de láminas desengrasadas como sin desengrasar, y obtenidas por fritura a presión atmosférica y a presión reducida.

## 4.6. MODELIZACIÓN

### 4.6.1. MODELIZACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE SECADO.

Con el fin de controlar la calidad final del producto frito es importante entender el proceso complejo que ocurre durante la fritura. Hay que tener en cuenta que el principal objetivo de la fritura por inmersión es la remoción parcial o completa de agua y un cocimiento de la superficie del alimento, ya que la absorción de grasa se producirá en los huecos creados por el vapor liberado justo cuando el producto se extraiga del medio de fritura y empiece la etapa de enfriamiento del producto. Por esta razón, la predicción de la pérdida de humedad es uno de los aspectos más importantes para modelar y controlar el proceso (Costa y Oliveira, 1999).

Los modelos matemáticos se utilizan en el diseño y optimización de los procesos industriales, permitiendo una mejor comprensión de los mismos y, por lo tanto, una mayor eficacia de los procesos productivos. Pero para formularlos es necesario realizar una serie de simplificaciones (Mulet, 1994).

La modelización de los datos de pérdida de humedad de las láminas de manzana en función del tiempo permite analizar como influye el tiempo de proceso en la velocidad de deshidratación.

La modelización sirve para identificar parámetros de interés en el proceso. En el caso de considerar modelos difusionales, en primer lugar, permite determinar la difusividad efectiva, que constituye un parámetro relacionado con la inversa de la resistencia interna a la transferencia de materia. También permite determinar la energía de activación, que es la mínima energía necesaria que debe poseer el agua para poder ser eliminada durante el proceso de secado. Representa una barrera energética que debe ser sobrepasada para que el proceso tenga lugar.

Fritura al vacío

Así, cuanto mayor sea el valor de energía de activación en un alimento, mayor será la dificultad del mismo para deshidratarse.

Para la modelización de las cinéticas de deshidratación de las láminas de manzana, se consideró que debido a que el espesor de la misma es muy inferior a su diámetro, éstas se comportaban como una lámina infinita.

Considerando que el transporte de agua desde el interior del sólido hacia la superficie tiene lugar principalmente por difusión (Moreira, 2001), la transferencia de agua puede ser descrita por un balance microscópico de materia y la segunda ley de Fick, que para una geometría de lámina infinita presenta la forma de la ecuación ya descrita anteriormente (Ec. 1.3.2.1):

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \quad \text{Ec. 1.3.2.1}$$

W es el contenido de humedad [kg agua; kg<sup>-1</sup>ss] al tiempo t [s]; D<sub>eff</sub> es el coeficiente de difusión efectiva [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>] y x es la distancia desde el plano de simetría [m]. Para resolver esta ecuación se plantean matemáticamente ciertas hipótesis de trabajo, las cuales se plasman en las siguientes condiciones iniciales y de contorno:

- i. El sólido es homogéneo e isótropo.
- ii. El sólido está inicialmente en equilibrio térmico con el ambiente que le rodea.
- iii. El contenido en humedad del sólido inicialmente es uniforme. Además, se considera que la humedad inicial es igual a la humedad crítica.
- iv. Hay un cambio repentino y sostenido de la humedad del medio deshidratante.

- v. La resistencia externa a la transferencia de materia se considera despreciable frente a la resistencia interna, siendo ésta la que controla el proceso de difusión.
- vi. La geometría (forma) de las piezas permanece constante durante el tiempo de secado.
- vii. Se asume la condición de simetría del sistema.

Integrando la ecuación resultante de la humedad local para el volumen total del producto, se obtiene una expresión que relaciona el contenido medio de humedad y el tiempo de deshidratación. Esta ecuación se expresa en términos de la humedad adimensional ( $\Psi$ ) (ecuación 1.3.2.3) (Crank, 1975; Simal *et al.*, 1998b; Tungsangprateep y Jindal, 2004) tal como se dijo anteriormente:

$$\Psi = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{\text{eff}} t}{4l^2}\right] \quad \text{Ec. 1.3.2.3}$$

$D_{\text{eff}}$  se calcula minimizando la suma de los cuadrados de la diferencia entre los valores experimentales y calculados, para esto se utiliza el método de Newton de la función SOLVER disponible en la hoja de cálculo EXCEL™.

La bondad de ajuste de los parámetros del modelo a los datos experimentales se calcula mediante el porcentaje de varianza explicada (ecuación 4.6.1.1):

$$\% \text{var} = \left(1 - \frac{S_{yx}^2}{S_y^2}\right) \times 100 \quad \text{Ec. 4.6.1.1}$$

Donde,  $S_y$  y  $S_{yx}$  son las desviaciones estándar de la muestra y de la correspondiente estimación, respectivamente.

Fritura al vacío

El efecto de la temperatura en la difusividad efectiva se describe usando una relación tipo Arrhenius (ecuación 4.6.1.2) (Saravacos y Maroulis, 2001). A partir de esta ecuación se calcula la energía de activación.

$$D_{\text{eff}} = D_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad \text{Ec. 4.6.1.2}$$

Donde:  $D_0$  es un factor preexponencial [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ],  $E_a$  es la energía de activación [ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ],  $R$  es la constante de los gases perfectos [ $8.31441 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ] y  $T$  es la temperatura [K].

#### 4.6.2. MODELIZACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE ABSORCIÓN DE ACEITE.

Como se explicó en la introducción, la modelización de las cinéticas de absorción de aceite se realiza generalmente con métodos empíricos, por la falta de un amplio conocimiento del mecanismo de transferencia que ocurre principalmente en la etapa de enfriamiento.

Como explica Nielsen (2006) los modelos empíricos que describen cinéticas de absorción, se conocen como modelos de caja negra. Estos tienen por lo general dos parámetros ajustables. El procedimiento para escoger cual modelo es el más adecuado es utilizar los datos experimentales y determinar el modelo empírico que presente una correlación más alta.

Uno de estos modelos que ha proporcionado buenos resultados es el de Monod (ecuación 4.6.2.1). La representación gráfica de esta ecuación es similar a la forma que presentan los datos experimentales de absorción de aceite y se conoce como la hipérbola rectangular.

$$Y = \frac{At}{B+t} \quad \text{Ec. 4.6.2.1}$$

Donde Y es la cantidad de aceite [kg kg<sup>-1</sup> bs) al tiempo t [s], y las constantes tienen un significado tal que, B que abarca de forma global a todo el mecanismo de absorción de aceite y es el tiempo en el que se obtiene la mitad del máximo de cantidad de aceite (A) acumulado en el tiempo de fritura.

## **4.7. PLANIFICACIÓN DE LAS EXPERIENCIAS DE FRITURA**

La planificación de las condiciones experimentales estuvo dirigida a la consecución de los objetivos propuestos en este trabajo. Primero fue necesaria la construcción del equipo experimental y su caracterización; y después de que el equipo tuvo el funcionamiento requerido, se procedió a las pruebas de fritura.

Las pruebas de fritura se desarrollaron en dos etapas. En la primera se realizaron experiencias de fritura a presión atmosférica, es decir, lo que se conoce como fritura por inmersión. La segunda etapa consistió en experiencias de fritura a presión reducida o vacío. En los dos casos se varió la temperatura del aceite y las presiones de trabajo para diferentes tiempos, tal como se indica en las tablas 4.7.1 y 4.7.2.

### **4.7.1 PROCESO**

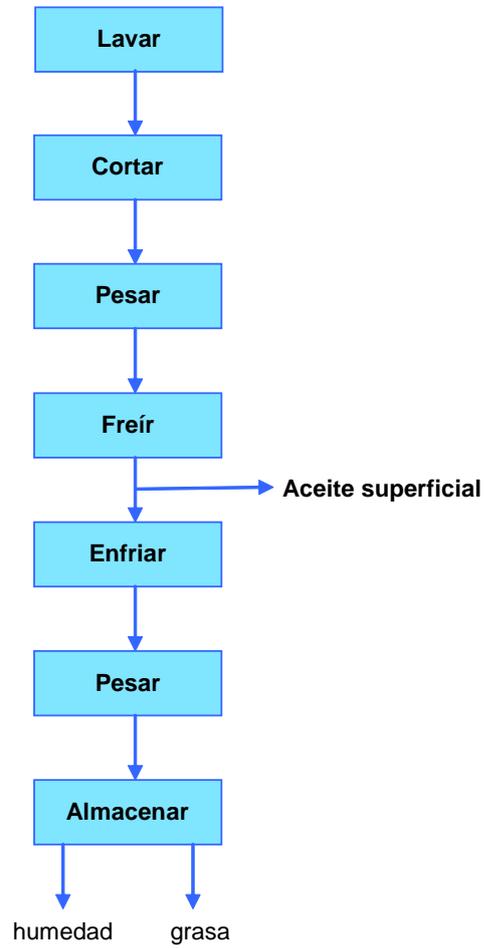
En la figura 4.7.1 se indica de forma general el proceso que se siguió en las experiencias de fritura de las láminas de manzana.

## Fritura al vacío

El lavado de las manzanas se realizó con agua potable. Se cortaron cuatro manzanas en láminas de 2 mm de espesor. Para cada punto experimental se utilizaron cuatro láminas, cada una de una manzana diferente. Este grupo de cuatro láminas se pesó antes de la fritura y a continuación se colocó en el portamuestras de la freidora.

El aceite se calentó a la temperatura de consigna y se mantuvo a esta temperatura una hora antes de freír las manzanas. El inicio de la fritura se consideró cuando se sumergió el portamuestras con las láminas en el aceite caliente. Transcurrido el tiempo de fritura, se levantó el portamuestras del aceite, se retiró las láminas del mismo y se eliminó el exceso de aceite superficial de las láminas con papel absorbente.

Se esperó a que las láminas se enfríen hasta la temperatura ambiente (25 °C) y se volvió a pesarlas. A continuación se almacenaron en recipientes de vidrio hasta su posterior análisis.



**Figura 4.7.1.** Esquema del proceso de fritura

A continuación se presentan detalladamente las condiciones experimentales planificadas a presión atmosférica y a presión reducida.

Fritura al vacío

#### 4.7.1.1. Fritura a presión atmosférica

La fritura a presión atmosférica se efectuó siguiendo el proceso anterior (apartado 4.7.1) y variando la temperatura para cada uno de los tiempos tal como se indica en la tabla 4.7.1. Las experiencias se realizan por duplicado.

**Tabla 4.7.1.** Temperaturas y tiempos de fritura a presión atmosférica

Presión [kPa]		Temperatura [°C]		
101.3	140	150	160	170
Tiempo [s]				
30	60	90	120	150

#### 4.7.1.2. Fritura a presión reducida o al vacío

El proceso de fritura de presión reducida se inició con la evacuación del aire con la bomba de vacío, hasta conseguir la presión de consigna, se esperó unos minutos para que se estabilizara la presión y luego se sumergió el portamuestras en el aceite caliente. Transcurrido el tiempo de fritura se levantó el portamuestras y se rompió el vacío. En el anexo 3 se detalla el procedimiento completo de fritura al vacío.

Siguiendo el procedimiento anterior se planificaron experiencias a 5 temperaturas y 3 niveles de vacío, tal como se muestra en la tabla 4.7.2. con 2 repeticiones en cada condición experimental. Para cada punto se efectuó el proceso de fritura a los tiempos indicados en la tabla 4.7.2.

**Tabla 4.7.2.** Temperaturas, presiones y tiempo de fritura al vacío.

T [°C]	Presión [ kPa]		
	8	13.33	18.66
80	X	X	X
90	X	X	X
100	X	X	X
110	X	X	X
120	X	X	X

Tiempo [s]						
30	60	90	120	150	180	300



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Previamente a la realización de las experiencias de fritura se procedió a la caracterización de la materia prima a utilizar. Para ello se determinó la humedad y °Brix de las manzanas a utilizar de acuerdo con la metodología expuesta en los apartados 4.2 y 4.3. Este análisis se efectuó antes de cada experiencia. En la tabla 5.1.1 se muestran los valores obtenidos.

**Tabla 5.1.1.** Contenido de humedad y °Brix de las manzanas frescas.

	kg H <sub>2</sub> O/ kg bs <sup>1</sup>	kg H <sub>2</sub> O/100 kg	°Brix
Promedio	5.4	84.3	12
Desviación estándar	± 0.5	± 1.2	± 0.8

<sup>1</sup> bs: base seca. n=28

Fritura al vacío

## 5.2. CINÉTICA DE LA PÉRDIDA DE AGUA

Las experiencias de fritura de las láminas de manzana se realizaron según el procedimiento detallado en el apartado 4.6.1.

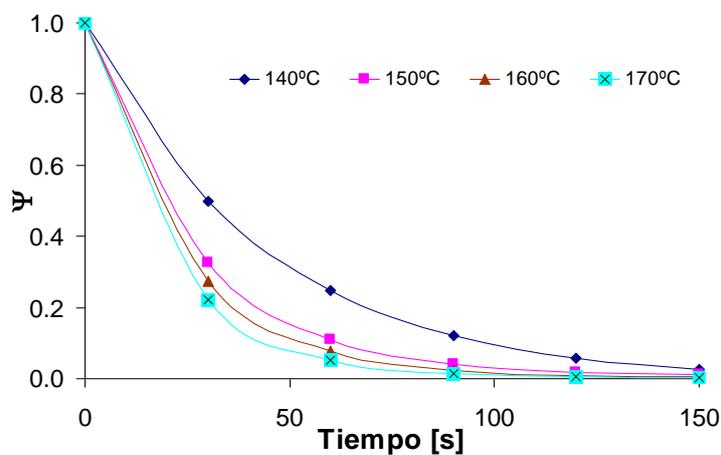
Para el cálculo de las cinéticas de pérdida de agua de las láminas de manzana se determinó la humedad de acuerdo a lo indicado en el apartado 4.2 y con los valores del peso inicial antes de la fritura se obtuvo el valor de la materia seca correspondiente. Con los valores obtenidos de humedad en base seca se realizó el análisis de los resultados que se presentan en los siguientes apartados.

### 5.2.1. FRITURA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Considerando el diseño de las experiencias indicado en el apartado 4.7.1.1, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 4.1.1 del anexo 4 y en la figura 5.2.1.1. En esta figura se representa la evolución de la humedad adimensional ( $\Psi$ ) de las láminas de manzana durante el tiempo del proceso de fritura. Se puede apreciar que presentan la forma de las curvas típicas de secado en su etapa de velocidad decreciente, pues en este caso el aparato experimental no permite apreciar la existencia de algún posible periodo de velocidad constante dada la rápida velocidad de pérdida de agua. Este gráfico es semejante a los reportados en la literatura tanto para procesos convencionales de deshidratación de alimentos (Prothon, 2003; Sacilik y Elicin, 2006), como para fritura (Farkas *et al.*, 1996b; Krokida *et al.*, 2000; Moreira *et al.*, 1995; Pedreschi y Moyano, 2005b; Sahin *et al.*, 1999a; Vitrac *et al.*, 2002).

Además, se aprecia que la velocidad de pérdida de agua depende de la temperatura. Cuando ésta aumenta se incrementa la velocidad de pérdida de agua y, por tanto, disminuye el tiempo de fritura. Así, durante los primeros 30 s, al

aumentar la temperatura se ve que se incrementa la pendiente de la curva. Es decir, a un tiempo determinado, a mayor temperatura el contenido de humedad residual en el producto disminuye (Budzaki y Seruga, 2005; Garayo y Moreira, 2002).



**Figura 5.2.1.1.** Variación de la humedad adimensional de las láminas de manzana, a las diferentes temperaturas del aceite de fritura. P=101.3 kPa.

## 5.2.2. FRITURA AL VACÍO

Se realizaron las experiencias indicadas en el apartado 4.7.1.2. En las figuras 5.2.2.1, 5.2.2.2, 5.2.2.3 se presentan los resultados de la evolución de la humedad adimensional ( $\Psi$ ) de las láminas de manzana durante el tiempo del proceso de fritura al vacío, a las diferentes condiciones de experimentación. En las tablas 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3 del anexo 4 se presentan los valores numéricos. Se puede

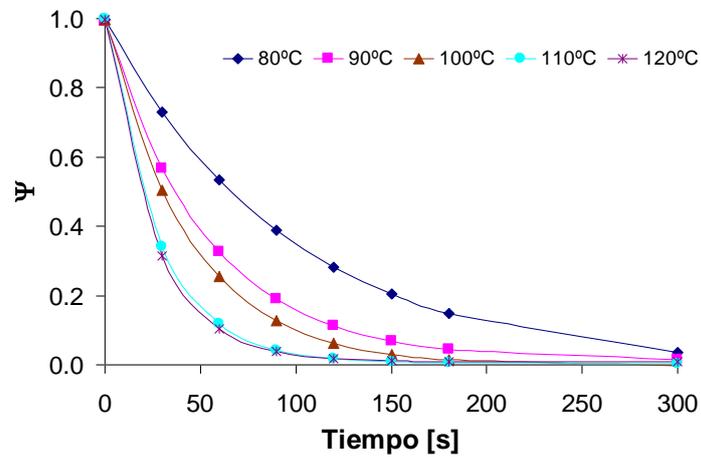
## Fritura al vacío

apreciar que las curvas presentan la forma típica de las curvas de secado en el período decreciente, de forma semejante a la representada en la figura 5.2.1.1 a presión atmosférica y a las reportadas en la literatura para fritura al vacío (Garayo y Moreira, 2002; Liu-Ping *et al.*, 2005a; Tan y Mittal, 2006).

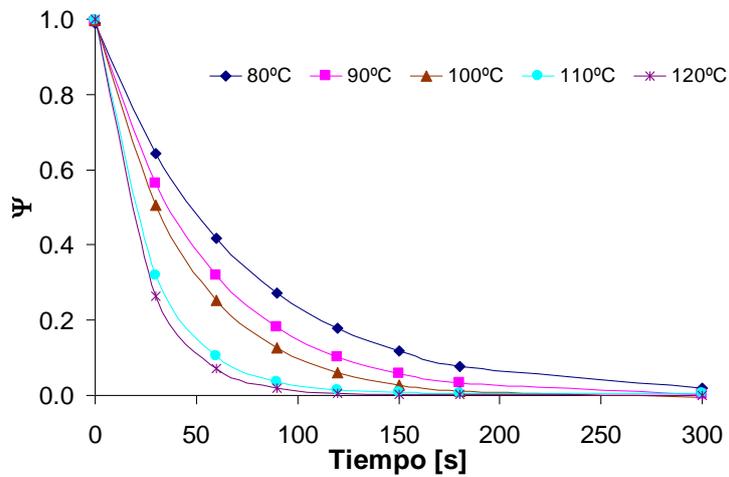
En estas figuras se aprecia como independientemente de la presión, cuando la temperatura aumenta se incrementa la velocidad de secado y, por tanto, disminuye el tiempo de fritura. Así, se tiene que a la presión de 13.3 kPa, al aumentar de 80 a 110 °C, a los 60 s, la humedad adimensional varía de 0.41 a 0.13.

Se aprecia también que a una determinada temperatura cuanto menor es la presión, la velocidad de evaporación aumenta y, por tanto, mayor es la velocidad de secado. Estos resultados coinciden con los de otros autores y con diferentes materias primas (Garayo y Moreira, 2002; Liu-Ping *et al.*, 2005b; Shyu *et al.*, 2005)

Los resultados que muestran las figuras 5.2.2.1, 5.2.2.2, 5.2.2.3 indican que disminuyendo la presión suficientemente se pueden alcanzar velocidades de fritura semejantes a las obtenidas en el proceso convencional a presión atmosférica, utilizando temperaturas mucho más altas. Así, por ejemplo, a presión atmosférica y 160°C de temperatura, la humedad a los 60 segundos es de 0.09, valor similar al que se obtiene a 8 kPa y 110°C. Esto indicaría que a ciertas condiciones de fritura a presión reducida se conseguiría el mismo efecto que con la fritura a presión atmosférica, pero con la ventaja de utilizar una temperatura más baja.

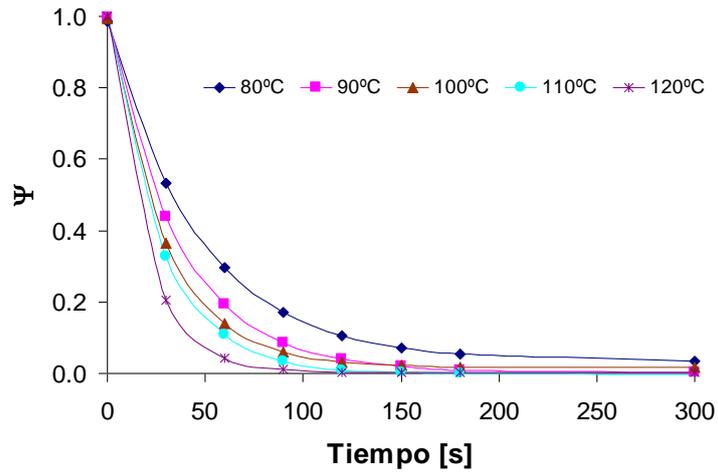


**Figura 5.2.2.1.** Variación de la humedad en función del tiempo de fritura, a diferentes temperaturas a la presión de 16.6 kPa.



**Figura 5.2.2.2.** Variación de la humedad en función del tiempo de fritura, a diferentes temperaturas a la presión de 13.3 kPa.

Fritura al vacío



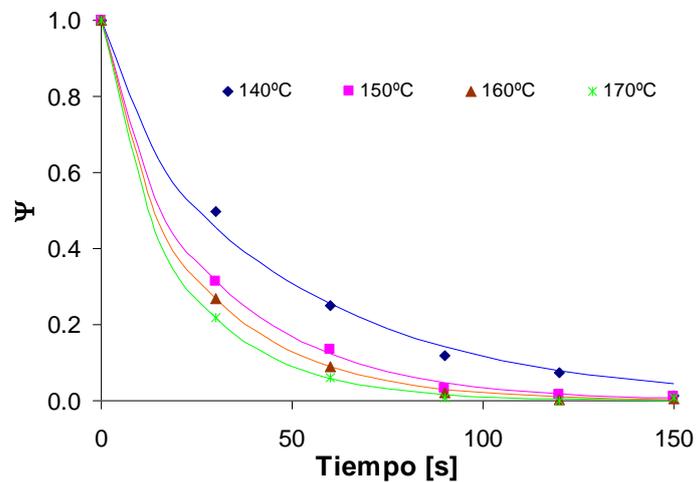
**Figura 5.2.2.3.** Variación de la humedad en función del tiempo de fritura, a diferentes temperaturas a la presión de 8 kPa.

### 5.3. MODELIZACIÓN

De acuerdo a lo expuesto en el apartado 4.6.1, se aplicó el modelo difusivo a los datos experimentales presentados en el apartado 5.2. A continuación se detallan los resultados experimentales obtenidos para las diferentes presiones y temperaturas.

### 5.3.1. EXPERIENCIAS A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

En la figura 5.3.1.1 se representa la evolución de la humedad de las láminas de manzana durante el proceso de fritura, expresada como humedad adimensional ( $\Psi$ ) frente al tiempo, tanto para los valores experimentales como para los resultantes de la aplicación del modelo difusivo. Cada punto es el promedio de dos repeticiones.



**Figura 5.3.1.1.** Humedad adimensional de las láminas de manzana, a diferentes temperaturas del aceite de fritura.  $P = 101.3$  kPa (Los puntos son los valores experimentales y las líneas son los obtenidos con el modelo difusional).

En la tabla 5.3.1.1 se presentan los valores de la difusividad efectiva calculados a partir del modelo difusivo propuesto, así como el porcentaje de varianza explicada obtenido para cada una de las temperaturas estudiadas.

Fritura al vacío

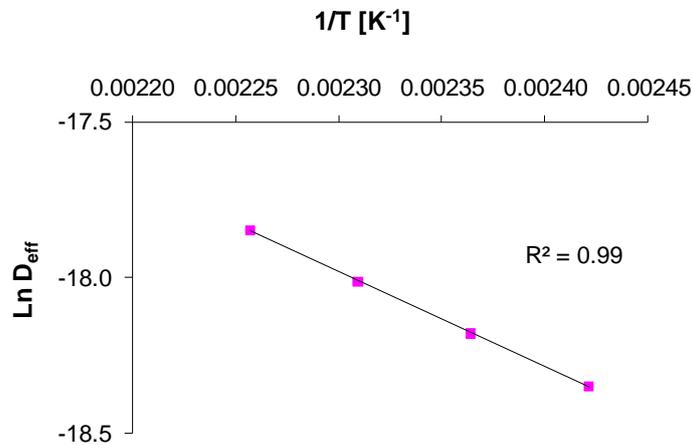
**Tabla 5.3.1.1.** Valores del coeficiente de difusión ( $D_{\text{eff}}$ )<sup>1</sup> y porcentaje de varianza (%var) a las diferentes temperaturas del aceite, P = 101.3 kPa.

T [°C]	$D_{\text{eff}} \times 10^9 [\text{m}^2/\text{s}]$	% var
140	$10.8 \pm 0.4$	96.5
150	$12.7 \pm 0.3$	99.7
160	$15.0 \pm 1.3$	99.7
170	$17.7 \pm 0.5$	99.9

<sup>1</sup> Media de dos repeticiones  $\pm$  desviación estándar

Se observa que los valores del porcentaje de varianza explicada, con excepción del correspondiente a 140 °C, son superiores al 99%, por lo cual se puede afirmar que los valores experimentales y los calculados muestran una buena correlación, y que la aplicación de este modelo difusivo describe satisfactoriamente la pérdida de agua en este proceso. La menor bondad del ajuste a 140°C se podría atribuir a que al existir, en este caso, un menor gradiente de temperatura de fritura y, por tanto, menor turbulencia en la interfase, presentaría una mayor resistencia externa a la transferencia de calor, que se vería reflejada en el coeficiente de difusión al no considerar dicha resistencia externa en el modelo. La transferencia de calor también se vería más favorecida por las altas temperaturas, al ser mayor la contribución del intercambio radiante, disminuyendo, por tanto, la resistencia externa a la transferencia de calor.

Los valores de  $D_{\text{eff}}$  de la tabla 5.3.1.1 se ajustaron a la ecuación tipo Arrhenius (Figura 5.3.1.2) y el logaritmo de la difusividad mostró una tendencia lineal frente a la inversa de la temperatura absoluta, con un coeficiente de correlación de 0.99. A partir de este resultado se calculó la energía de activación, cuyo valor es de  $25.4 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ .



**Figura 5.3.1.2.** Influencia de la temperatura de fritura en la difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ) en las láminas de manzana.

No es posible comparar los valores de difusividad de la humedad en las láminas de manzana obtenidos mediante este proceso con los datos reportados en bibliografía, puesto que los encontrados son para procesos diferentes al de fritura. Se dispone de datos para manzana deshidratada mediante diferentes técnicas y sometida a distintos tratamientos previos. En estos procesos la temperatura de deshidratación es inferior a la utilizada en fritura.

En la deshidratación por aire caliente de cubos de manzana, Simal, *et al.* (1997) reportan valores de la difusividad entre  $3.2$  y  $12.7 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para temperaturas entre  $30$  y  $60$  °C y una  $E_a$  de  $39.7 \text{ kJ mol}^{-1}$ , mientras que cuando se realizaba un tratamiento osmótico previo los valores estaban comprendidos entre  $2$  y  $9.8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para temperaturas entre  $30$  y  $90$  °C, y la  $E_a$  fue de  $24 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Para cubos de manzana (cv. *Golden Delicious*) secados con aire caliente y asistido por microondas a  $50$ ,  $60$  y  $70$  °C, Prothon (2003) reporta valores de  $D_{eff}$  de  $1.6$ ,  $2.9$  y

Fritura al vacío

$4.4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  respectivamente, y una  $E_a$  calculada para este intervalo de temperatura de  $44.8 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Sacilik y Elicin (2006), para láminas de manzana (cv. *Starking*) deshidratadas con aire caliente entre 40 y 60°C, obtienen coeficientes de difusividad entre 2.27 y  $4.97 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Velic *et al.* (2004) reportan valores entre 1.79 y  $4.4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  para secado convectivo de láminas de manzana a 60 °C y velocidad del aire entre 0.6 y 2.75  $\text{ms}^{-1}$ . Como se puede observar, existe bastante dispersión en los datos encontrados en la bibliografía aunque todos se encuentran dentro de un mismo orden de magnitud.

Además, en la bibliografía se encuentran valores de difusividad de otros materiales deshidratados por fritura. Así, para patatas cortadas en tiras y fritas a 160, 170 y 180 °C se obtienen valores de 4.14, 5.24 y  $6.71 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  respectivamente, y una  $E_a$  de  $39.4 \text{ kJ mol}^{-1}$  (Moyano y Berna, 2002). Para patatas cortadas en láminas (*chips*) y fritas a 120, 150 y 180 °C, Pedreschi *et al.* (2005a) reportan valores de difusividad tales como 3.86, 9.86 y  $0.72 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  respectivamente y una  $E_a$  de  $37 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

Los valores de difusividad para un producto croata llamado “krostula”, procesado por fritura a temperaturas entre 160 y 190 °C, están en el intervalo de 5.8 y  $9.7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  y la energía de activación es de  $29.7 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  (Budzaki y Seruga, 2005).

Se observa pues que los valores de difusividad efectiva determinados en este trabajo (Tabla 5.3.1.1) son superiores a los reportados en la literatura. No obstante, se encuentran dentro del intervalo general de  $10^{-9}$  y  $10^{-11}$  para deshidratación de alimentos (Sacilik y Elicin, 2006).

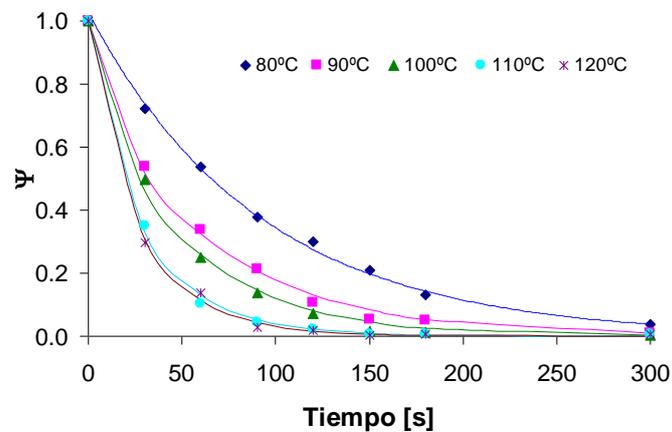
En cuanto al valor de energía de activación calculado para las láminas de manzana, se observa que es menor que los obtenidos por otros autores, tanto para manzana deshidratada como para fritura de otros productos. Esto indicaría

una mayor facilidad en la extracción del agua comparado con otros procesos de deshidratación (Prothon, 2003).

### 5.3.2. EXPERIENCIAS A PRESIÓN SUBATMOSFÉRICA

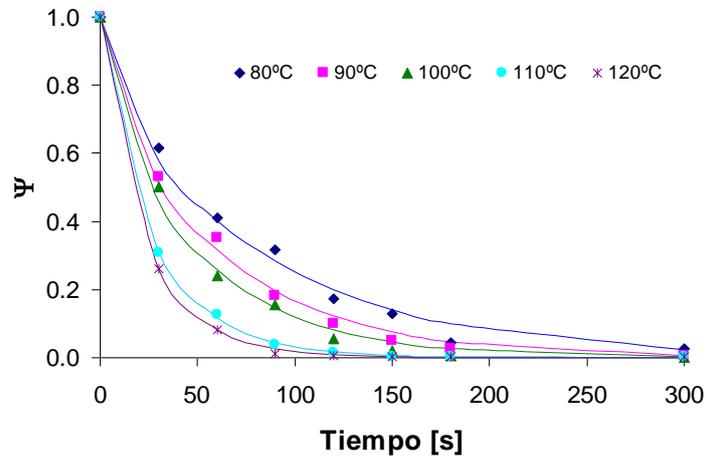
En las figura 5.3.2.1, 5.3.2.2 y 5.3.2.3 se representa la evolución de la humedad de las láminas de manzana durante el proceso de fritura a presión subatmosférica, expresada como humedad adimensional ( $\Psi$ ) frente al tiempo, tanto para los valores experimentales, como para los resultantes de la aplicación del modelo difusivo. Cada punto es el promedio de dos repeticiones.

En estas figuras se puede apreciar un comportamiento similar al obtenido en las experiencias a presión atmosférica.

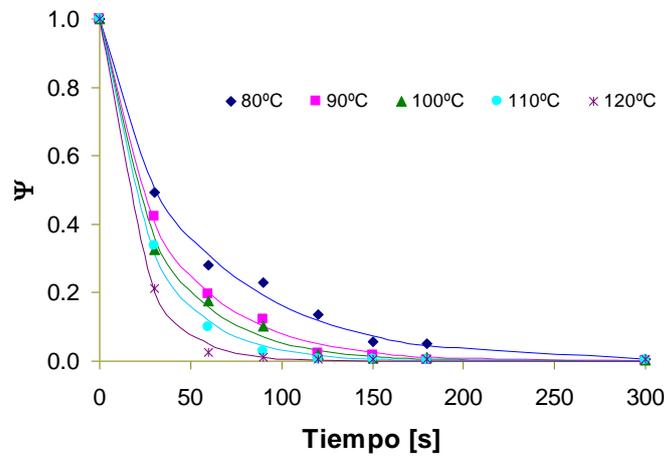


**Figura 5.3.2.1.** Humedad adimensional de las láminas de manzana, a diferentes temperaturas del aceite de fritura.  $P = 18.6$  kPa (Los puntos son los valores experimentales y las líneas son los obtenidos con el modelo difusional).

### Fritura al vacío



**Figura 5.3.2.2.** Humedad adimensional de las láminas de manzana, a diferentes temperaturas del aceite de fritura.  $P = 13.3$  kPa (Los puntos son los valores experimentales y las líneas son los obtenidos con el modelo difusional).



**Figura 5.3.2.3.** Humedad adimensional de las láminas de manzana, a diferentes temperaturas del aceite de fritura.  $P = 8$  kPa (Los puntos son los valores experimentales y las líneas son los obtenidos con el modelo difusional).

En la tabla 5.3.2.1 se presentan los valores de la difusividad efectiva calculados a partir del modelo difusivo propuesto, así como el porcentaje de varianza explicada obtenido (valor entre paréntesis) para cada una de las presiones y temperaturas estudiadas. Para facilitar la comparación de los valores obtenidos en las experiencias a presión subatmosférica con las de fritura convencional, se han incluido en esta tabla los valores de la tabla 5.3.1.1.

Se observa que los valores del porcentaje de varianza explicada, con excepción de los valores a 80 °C y 100 °C a presión de 13.3 kPa, son superiores al 99%, por lo cual se puede afirmar que los valores experimentales y los calculados muestran una buena correlación. Esto indica que la aplicación de este modelo difusivo describe satisfactoriamente la pérdida de agua en este proceso, en las condiciones estudiadas.

También se aprecia en esta tabla que al aumentar la temperatura a una presión determinada, los valores de difusividad aumentan. Además, para una misma temperatura, al aumentar la presión disminuye la difusividad, lo cual concuerda con lo expuesto por Reid *et al.* (1997). De acuerdo con estos autores, a presiones de moderadas a bajas el coeficiente de difusión de los gases es inversamente proporcional a la presión o densidad. Esto es debido a la variación de densidad de los gases. Por otro lado, cuanto más disminuye la presión más desciende el punto de ebullición del agua (Tabla 5.3.2.2) y, en consecuencia, el agua albergada en el producto empezará a vaporizarse más rápidamente cuanto menor sea la presión. Araki *et al.* (2001) observaron que durante la liofilización de láminas de manzana la permeabilidad al vapor de agua mostraba una tendencia a disminuir conforme aumentaba la presión, si bien estos autores no modelizaron dicha variación.

Fritura al vacío

**Tabla 5.3.2.1.** Valores del coeficiente de difusión ( $D_{\text{eff}}$ )<sup>1</sup>, Energía de activación ( $E_a$ )<sup>1</sup> y porcentaje de varianza explicada (% var) a diferentes presiones y temperaturas del aceite.

T[°C]	P[kPa]	$D_{\text{eff}} \times 10^9 \text{ [m}^2 \text{ s}^{-1}]$ (% var)			
		101.3	18.6	13.3	8.0
170		17.7 ± 0.5 (99.9)			
160		15.0 ± 1.3 (99.7)			
150		12.7 ± 0.3 (99.7)			
140		10.8 ± 0.4 (96.5)			
120			13.3 ± 1.9 (99.7)	15.5 ± 0.5 (99.9)	18.9 ± 1.7 (99.8)
110			12.3 ± 0.2 (99.7)	13.01 ± 0.5 (99.9)	13.1 ± 1.4 (99.6)
100			7.8 ± 0.6 (99.2)	9.9 ± 0.7 (98.1)	11.1 ± 0.5 (99.5)
90			6.2 ± 0.9 (99.3)	7.2 ± 1.2 (99.7)	9.4 ± 0.5 (99.7)
80			4.56 ± 0.34 (99.7)	5.2 ± 0.4 (98.7)	6.5 ± 0.3 (99.3)
<b><math>E_a</math> [kJ mol<sup>-1</sup>]</b>		25.4 ± 0.9 (99.9)	32.6 ± 10.1 (97.3)	32.1 ± 5.0 (99.3)	28.5 ± 9.0 (97.1)

<sup>1</sup> Media de dos repeticiones ± desviación estándar

**Tabla 5.3.2.2.** Diferencia entre la temperatura del aceite y la temperatura de ebullición del agua ( $\Delta T$ ) a las diferentes presiones.

		$\Delta T$ [°C]			
T [°C]	P [kPa]	101.3	18.6	13.3	8
Aceite	Ebullición H <sub>2</sub> O →	100	58.5	51.5	41.5
170		70			
160		60			
150		50			
140		40			
120			61.5	68.5	78.5
110			51.5	58.5	68.5
100			41.5	48.5	58.5
90			31.5	38.5	48.5
80			21.5	28.5	38.5

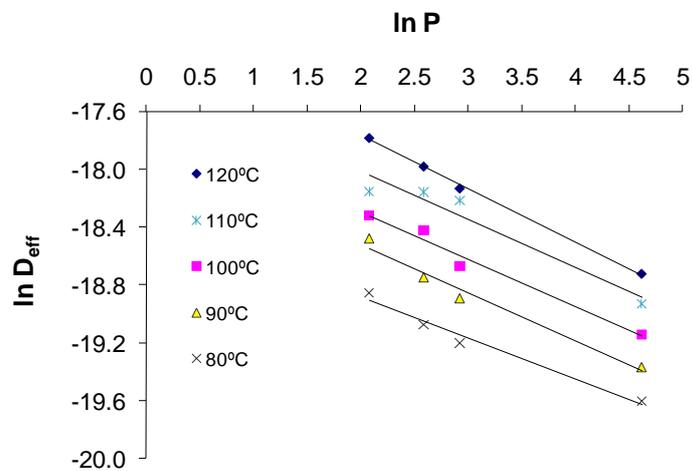
Puesto que existe una relación en gases entre  $D_{\text{eff}}$  y la presión del proceso (Reid *et al.*, 1997) resulta interesante examinar este aspecto en el caso de la fritura puesto que se ha procesado a diferentes presiones. También con el fin ampliar la base experimental y relacionar las experiencias a presión atmosférica y subatmosférica, se calcularon (extrapolaron) a partir de la relación de Arrhenius, obtenida en el apartado 5.3.1, los valores de  $D_{\text{eff}}$  a presión atmosférica a las temperaturas utilizadas en las experiencias a presión reducida (de 80 a 120 °C). Ya que en gases se sugiere una relación lineal entre  $D_{\text{eff}}$  y la inversa de la presión se representó el  $\ln(D_{\text{eff}})$  frente a  $\ln(P)$ , obteniéndose una línea recta (Figura 5.3.3.4). Esto indica que la relación entre la presión y la difusividad a temperatura constante viene dada por una función potencial del tipo:

$$D_{\text{eff}} = a \cdot P^{-n}$$

Ec. 5.3.2.1

## Fritura al vacío

Se trataría pues de una dependencia de la difusividad con la inversa de la presión, tal como sugiere Reid *et al.* (1997) aunque la presión vendría afectada de un exponente. El valor medio del exponente  $n$  se obtiene de las pendientes de las rectas obtenidas en la Figura 6.3.2.4 y es igual a  $0.33 \pm 0.03$ ; asimismo, el valor del factor pre-exponencial  $a$  obtenido es  $17.6 \pm 0.5$ . Si bien en el párrafo anterior se afirmó que en mezclas binarias de gases la difusividad es inversamente proporcional a la presión, el hecho de que esta proporcionalidad sea potencial podría atribuirse a la resistencia que presenta la matriz sólida del alimento. Las correlaciones obtenidas (Figura 5.3.2.4) son significativas ( $r^2 > 0.975$ ) excepto para las experiencias a  $110\text{ }^\circ\text{C}$  ( $r^2=0.931$ ). El hecho de que los valores de difusividad calculados a presión atmosférica sigan la misma correlación con los obtenidos experimentalmente es un indicador más de la bondad del modelo difusional propuesto. No obstante, para obtener una mayor fiabilidad en los resultados sobre la relación difusividad con la presión sería aconsejable ampliar la experimentación.

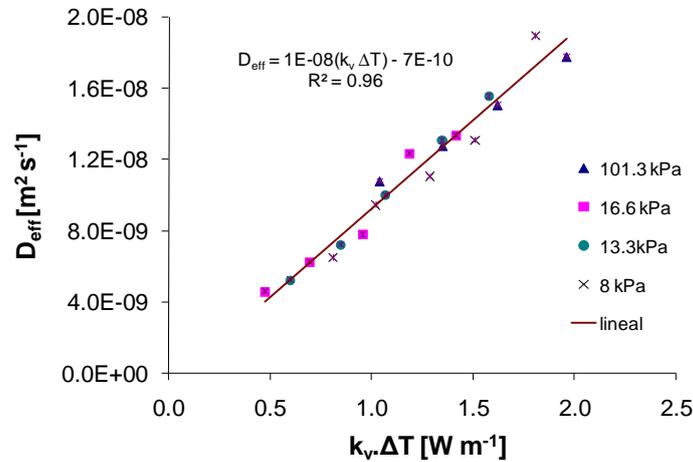


**Figura 5.3.2.4.** Influencia de la presión sobre el coeficiente de difusión efectiva ( $D_{\text{eff}}$ ), a las diferentes temperaturas de fritura.

Además de considerar que la difusividad permite cuantificar la transferencia de agua del alimento al aceite, esta transferencia se corresponde con la cantidad de calor suministrada al alimento. Así, la transferencia de materia será mayor cuanto mayor sea el flujo de calor del aceite al producto. Para cuantificar el flujo de calor entre el producto y el aceite se parte de dos supuestos: primero, que en la superficie del producto se formará una capa de vapor y, segundo, que la temperatura de la superficie sólida es la de ebullición del agua a esa presión. Por tanto, el flujo de calor será igual, de acuerdo con la ley de Fourier, a la diferencia de temperatura del aceite menos la de ebullición del agua ( $\Delta T$ ), multiplicada por la conductividad del vapor del agua ( $k_v$ ) a las condiciones de P y T de fritura.

De esta manera, al representar  $k_v \cdot \Delta T$  frente a  $D_{\text{eff}}$  (Figura 5.3.2.5) se aprecia que los puntos están alineados, lo cual indica no solo la proporcionalidad directa que debe existir entre transferencia de calor y transferencia de materia, sino también que las hipótesis realizadas son plausibles. Es decir esto evidencia la buena concordancia entre el modelo de pérdida de humedad y el de transferencia de calor, pudiendo servir, por tanto, para establecer las condiciones de fritura deseadas en función de la presión. De esta manera aunque la relación entre  $D_{\text{eff}}$  y P expresada por la relación 5.3.2.1 tenía una base experimental relativamente débil (3 presiones subatmosféricas y presión atmosférica), el considerar la transferencia de calor refuerza la cuantificación de esta relación.

## Fritura al vacío

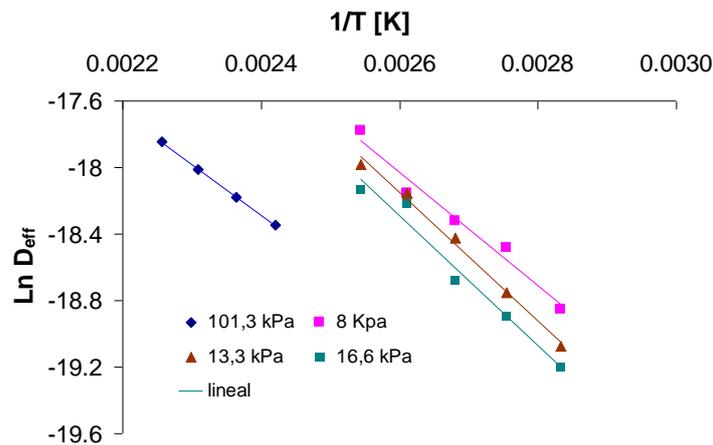


**Figura 5.3.2.5.** Influencia de la diferencia entre las temperaturas del aceite y la de ebullición del agua en el coeficiente de difusión efectivo, a las diferentes presiones.

Con el fin de establecer la influencia de la temperatura, los valores de  $D_{eff}$  de la tabla 5.3.2.1 se ajustaron a la ecuación tipo Arrhenius (Ec. 4.6.1.4). El logaritmo de la difusividad mostró una tendencia lineal frente a la inversa de la temperatura absoluta (Figura 5.3.2.6), con un coeficiente de correlación de 0.99 para las presiones de 101.3 y 13.3 kPa y de 0.97 para las otras dos presiones. A partir de estos resultados se calculó la energía de activación para cada una de las presiones, cuyos valores se presentan en la misma tabla 5.3.2.1.

En cuanto a estos valores de energía de activación, se aprecia que cuando disminuye el nivel de vacío disminuye el valor de la  $E_a$  y que además los valores obtenidos a presión subatmosférica son mayores que el valor a presión atmosférica. Sin embargo no existen diferencias significativas al 95% ( $p > 0.05$ ) entre los valores de  $E_a$  obtenidos, por lo cual no se puede afirmar, a partir de estos resultados, que exista una influencia de la presión sobre la energía de activación. Lo cual, por otra parte, es lógico, puesto que la energía de enlace del agua con la

matriz vegetal, así como el calor latente de vaporización varían poco con la presión.



**Figura 5.3.2.6.** Influencia de la temperatura del aceite en el coeficiente de difusión efectivo ( $D_{eff}$ ), a las diferentes presiones.

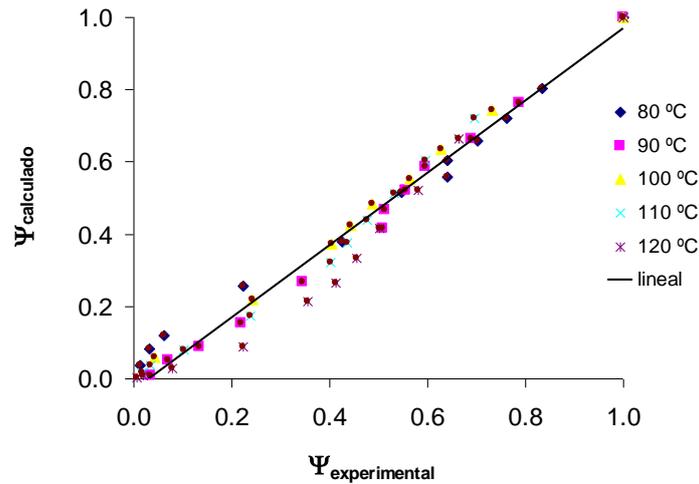
### 5.3.2.1. Validación del modelo

A fin de comprobar la validez del modelo propuesto se realizaron experiencias con láminas de 5 mm de espesor, diferente al ensayado anteriormente. Estas experiencias se realizaron según el procedimiento detallado en el apartado 5.6.1.

Al representar la humedad adimensional calculada ( $\Psi_{calculada}$ ) utilizando la  $D_{eff}$  obtenida para las láminas de 2 mm, frente a la obtenida experimentalmente ( $\Psi_{experimental}$ ) con láminas de 5 mm (Figura 6.3.2.1.1) se aprecia que los puntos están alineados y el coeficiente de correlación obtenido es de 0.98, lo cual indica la validez del modelo de pérdida de humedad que, como era de esperar, es independiente del espesor de la muestra. Además, cabe señalar que los datos

Fritura al vacío

experimentales obtenidos en estas experiencias no fueron utilizados en la identificación paramétrica, lo cual es un indicador también de la bondad del modelo utilizado.



**Figura 5.3.2.1.1.** Humedad adimensional calculada con el modelo difusional, utilizando la  $D_{\text{eff}}$  para las láminas de 2 mm, frente a la humedad adimensional experimental de las láminas de manzana, con espesor de 5 mm, a diferentes temperaturas del aceite de fritura.  $P=8$  kPa.

#### 5.4. ABSORCIÓN DE ACEITE DURANTE LA FRITURA

Como se indicó en la introducción, el mecanismo de absorción de aceite es un aspecto importante de la fritura que ha sido estudiado ampliamente. Diversos estudios han demostrado que la mayor parte del aceite no penetra en el producto durante la fritura, sino al extraer el producto del aceite, cuando se enfría (Garayo y Moreira, 2002; Liu-Ping *et al.*, 2005a; Moreira *et al.*, 1995; Saguy y Pinthus, 1995;

Vitrac *et al.*, 2000). En este trabajo la absorción de aceite por el alimento se determinó tras finalizar la fritura y enfriarlo, por lo cual el mecanismo de la absorción de aceite no se ha estudiado. Por ello, los datos experimentales obtenidos permiten un enfoque fenomenológico, sin tener en cuenta el mecanismo de transferencia (Krokida *et al.*, 2000).

De acuerdo a lo indicado en el apartado 4.4 de Materiales y Métodos se determinó el contenido de aceite de las muestras procesadas a distintas condiciones de presión y temperatura. En las figuras 5.4.1, 5.4.2 y 5.4.3 se presenta la evolución del contenido de aceite de las muestras con el tiempo, expresado en base seca, a diferentes presiones y temperaturas. Los datos numéricos se presentan en el anexo 4.

Con el propósito de modelizar la cinética de absorción de aceite se utilizó la ecuación del modelo de Monod (Ecuación 4.6.2.1). En la tabla 5.4.1, se presentan los valores obtenidos de las constantes de ajuste calculadas por regresión, así como el porcentaje de varianza explicada, para las diferentes presiones y temperaturas del aceite. Asimismo, en las figuras 5.4.1, 5.4.2 y 5.4.3 se presentan las curvas de absorción de aceite calculadas con dicho modelo y representadas como líneas continuas.

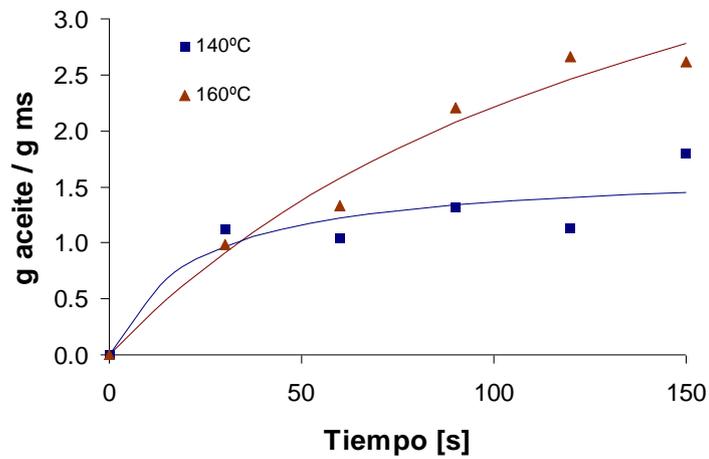
En las figuras 5.4.1 y 5.4.2 se observa como el contenido de aceite se incrementa rápidamente en los primeros 30 s del proceso de fritura, independientemente de la presión. Pasado este tiempo, la velocidad de absorción de aceite disminuye. Este incremento del contenido de aceite coincide con el tiempo en que se pierde una considerable cantidad de humedad de las láminas (apartado 5.2.1), indicando que existe una relación directamente proporcional entre el contenido de aceite de la rodaja y la pérdida de humedad de la misma (Figura 5.4.4) tal como se indica en la literatura tanto para fritura convencional (Baumann y Escher, 1995; Gamble *et al.*,

Fritura al vacío

1987; Krokida *et al.*, 2000), como para fritura al vacío (Liu-Ping *et al.*, 2005b; Shyu *et al.*, 2005).

**Tabla 5.4.1.** Valores de las constantes A, B y porcentaje de varianza (% var) a las diferentes presiones y temperaturas del aceite.

P [kPa]	T [°C]	A [g aceite/g bs]	B [s]	% var
101.3	140	1.7	21.7	85.5
	160	5.6	154.8	97.4
13.3	90	1.2	23.5	92.4
	100	1.1	15.1	88.4
	110	0.9	6.2	93.5
8.0	110	1.1	5.7	99.2



**Figura 5.4.1.** Contenido de aceite de las láminas de manzana a 140°C, 160°C y P = 101.3 kPa, (Los puntos son los valores experimentales y las líneas son los obtenidos con el modelo de Monod).

En la figura 5.4.1 se observa como durante la fritura a presión atmosférica, pasados los primeros 30 s, al aumentar la temperatura el contenido de aceite también se incrementa. Esto confirmaría que cuanto más alta es la temperatura se pierde más rápidamente el agua, con lo cual el contenido residual de agua en la rodaja es menor y, por lo tanto, se dispone de más espacio intercelular que pasa a ser ocupado por el aceite (Budzaki y Seruga, 2005; Math *et al.*, 2004). Además, conforme aumenta la temperatura la costra superficial se desarrolla más rápidamente y en consecuencia las propiedades favorables para la absorción de aceite; pues con la formación de la costra disminuye no solo la hidrofiliidad en la superficie del producto (Baumann y Escher, 1995) sino que también disminuye la contracción, aumentando el espacio que puede ser ocupado por el aceite.

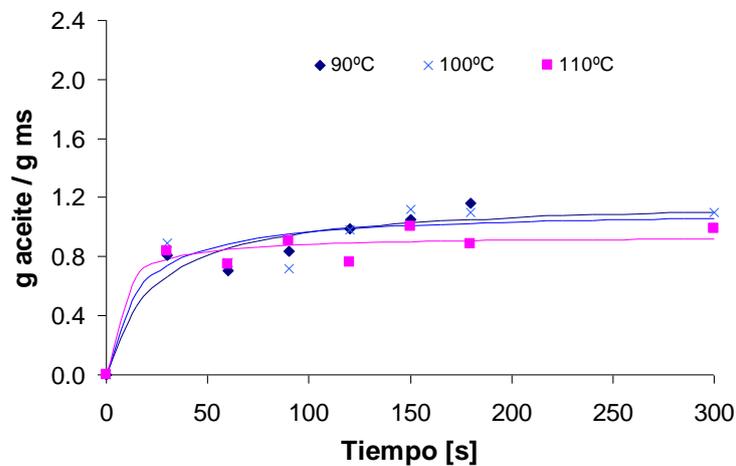
Cuando se procesa a presión subatmosférica y se varía la temperatura (Figura 5.4.2) no se observa una clara diferencia en el contenido final de aceite de las muestras. Transcurridos los primeros 30 s parece que se estabiliza la absorción de aceite. Garayo y Moreira (2002) obtuvieron resultados similares para chips de patata. Estos autores sugieren que el contenido final de aceite del producto en el caso de fritura a presión subatmosférica no es función de la temperatura, sino del tiempo de fritura y, por tanto, de la humedad remanente del producto, que aumenta al disminuir la temperatura del producto.

También se observa en la figura 5.4.2 como la velocidad de absorción de aceite, que viene dada por la pendiente del primer tramo de la curva, aumenta con la temperatura. No obstante, no existe concordancia en la bibliografía sobre la relación entre presión y velocidad de absorción de aceite. Por ejemplo, Liu-Ping *et al.* (2005b) observaron que la velocidad de absorción de aceite en *chips* de zanahoria aumentaba con la temperatura. Por el contrario, Tan y Mittal (2006) observaron una menor velocidad absorción de aceite en fritura de *donuts* al vacío cuanto mayor era la temperatura de fritura; cabe señalar que las temperaturas con

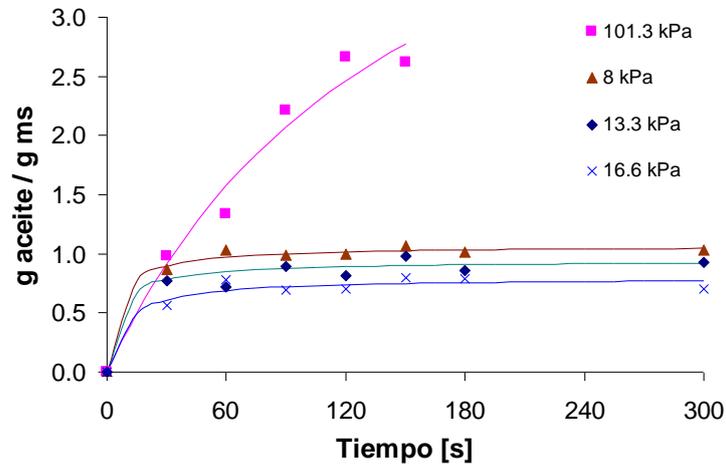
## Fritura al vacío

las que trabajan estos autores son superiores ( $T = 150$  a  $180$  °C) a los de los primeros ( $T = 110$  °C).

En cuanto al efecto de la presión, de manera general se observa que a presión subatmosférica el contenido de aceite disminuye comparado con las láminas procesadas a presión atmosférica, cuyo contenido de aceite se incrementa considerablemente (Figura 5.4.3) sobre todo a temperaturas elevadas ( $T = 160$ °C). Garayo y Moreira (2002) observaron también diferencias significativas en cuanto al contenido final de aceite en *chips* de patata procesados a presión atmosférica (101.3 kPa) y al vacío (3.1 kPa). Tan y Mittal (2006) observaron en la fritura de *donuts* que el contenido final de aceite se veía afectado de forma significativa por la presión, de manera que éste disminuía al aumentar el nivel de vacío, o sea, al disminuir la presión de trabajo.



**Figura 5.4.2.** Contenido de aceite de las láminas de manzana, a 90°C, 100°C, 110°C y  $P = 13.3$  kPa. (Los puntos son los valores experimentales y las líneas son los obtenidos con el modelo de Monod).

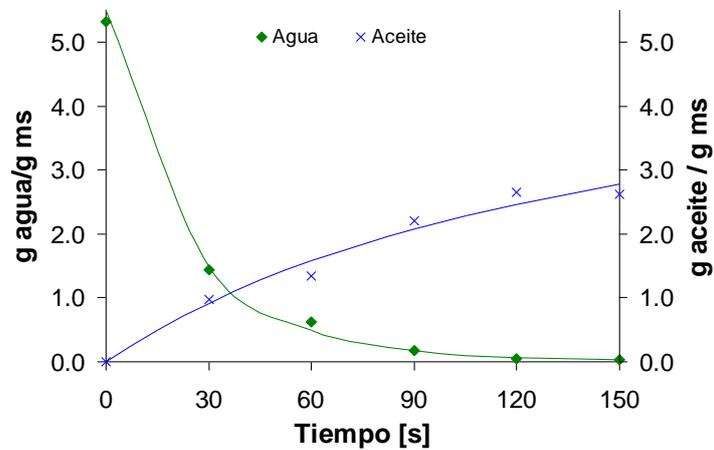


**Figura 5.4.3.** Contenido de aceite de las láminas de manzana, a 160°C y 101.3 kPa, y a 110°C y 8, 13.3 y 16.6 kPa. (Los puntos son los valores experimentales y las líneas son los obtenidos con el modelo de Monod).

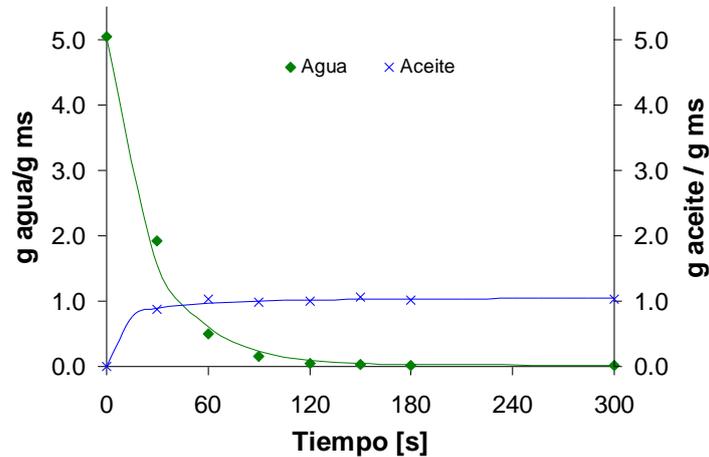
En las Figuras 5.4.4 y 5.4.5 se presenta el comportamiento simultáneo de la pérdida de agua y de la absorción de aceite durante el proceso de fritura atmosférica y subatmosférica, respectivamente. En estas figuras se puede observar como existe una relación entre la cantidad de agua perdida y la absorción de aceite durante la fritura. A las dos presiones de trabajo, a los 30 s las láminas han perdido la mayor cantidad de agua (> 60 %), mientras que respecto a la absorción de aceite, se observa que a la presión de 101.3 kPa (Figura 5.4.4) el contenido en aceite es aproximadamente una tercera parte del valor final y después continúa incrementándose. En cambio, a la presión de 8 kPa (Figura 5.4.5) el contenido de aceite a los 30 s viene a ser el máximo ganado y después se mantiene prácticamente constante. Esta relación entre la absorción de aceite y la pérdida de agua es similar a la reportada por Lui-Ping *et al.* (2005b) en la fritura a presión subatmosférica y por Budzaki y Seruga (2005) a presión atmosférica,

## Fritura al vacío

entre otros autores. No obstante, hay que señalar que si bien la pérdida de agua y la absorción de aceite están relacionadas, el contenido final de aceite no se corresponde con la cantidad total de agua perdida. Este hecho puede ser debido a cambios en la microestructura del alimento durante el procesado, principalmente relacionados con el encogimiento, que dificultan la absorción de aceite.



**Figura 5.4.4.** Evolución de la humedad adimensional y del contenido de aceite de las láminas de manzana a 160°C y 101.3 kPa. (Los puntos son los valores experimentales y las líneas los obtenidos con el modelo difusional y de Monod).



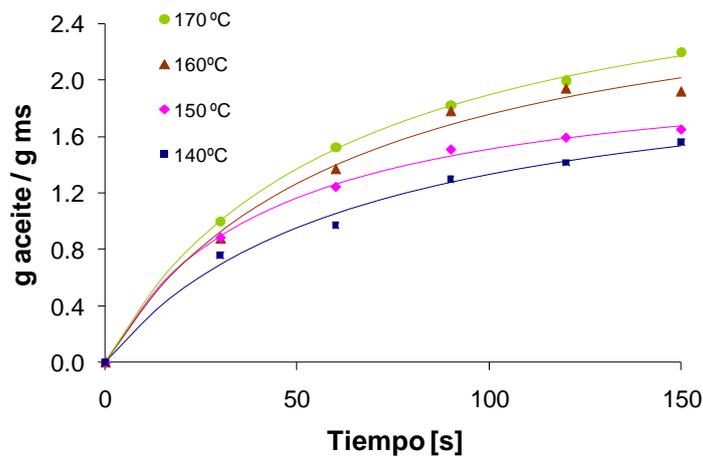
**Figura 5.4.5.** Evolución de la humedad adimensional y del contenido de aceite de las láminas de manzana a 110°C y 8 kPa. (Los puntos son los valores experimentales y las líneas los obtenidos con el modelo difusional y de Monod).

Con el fin de disponer de más información sobre la absorción de aceite, puesto que no se disponía de más datos experimentales del contenido de aceite de las muestras para las distintas condiciones experimentales utilizadas, se procedió a calcular el contenido de aceite por diferencia de los datos de humedad obtenidos en las experiencias de fritura. A partir de estos datos y utilizando el modelo propuesto para modelizar las curvas de absorción de aceite (Ecuación 4.6.2.1) se calcularon los valores de las constantes de ajuste, que se presentan en las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 del anexo 5, junto con el porcentaje de varianza explicada obtenido.

En las figuras 5.4.6, 5.4.7, 5.4.8 y 5.4.9 se presenta la evolución del contenido de aceite de las muestras con el tiempo, expresado en base seca, a las diferentes presiones y temperaturas ensayadas. Los puntos representan el contenido en

## Fritura al vacío

aceite calculado a partir de la humedad experimental y el contenido en materia seca de las muestras y las líneas representan el ajuste obtenido.

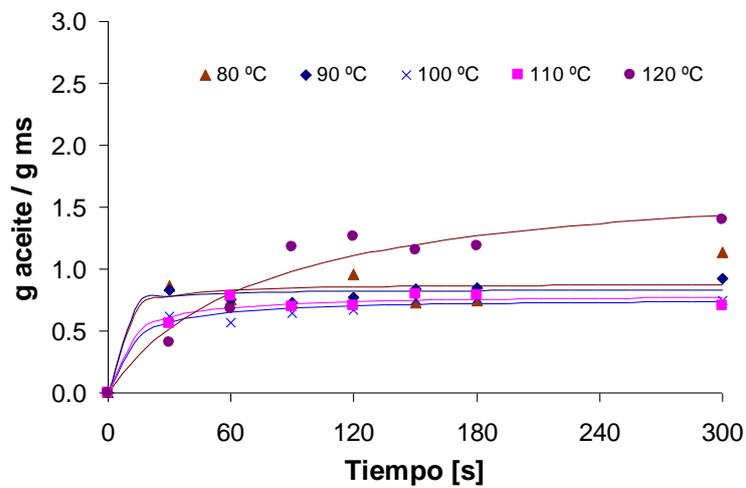


**Figura 5.4.6.** Contenido de aceite de las láminas de manzana  $P = 101.3$  kPa. (Los puntos son los valores calculados a partir de la humedad experimental y las líneas son los obtenidos con el modelo de Monod).

En la Figura 5.4.6 se observa de nuevo como, al procesar a presión atmosférica, la absorción de aceite aumenta con la temperatura del mismo. También se puede observar que la velocidad de absorción de aceite, que viene dada por la pendiente del primer tramo de la curva, es mayor cuanto mayor es la temperatura de fritura. Krokida *et al.* (2000) observaron una relación del mismo tipo entre temperatura y velocidad de absorción de aceite.

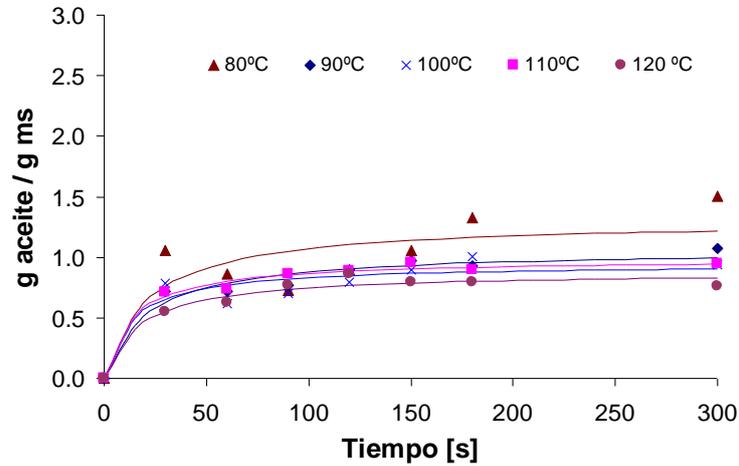
En el resto de figuras, correspondientes al procesado a presión subatmosférica (Figuras 5.4.7, 5.4.8 y 5.4.9), no se tiene la misma evidencia en cuanto al efecto

de la temperatura y el contenido final de aceite o la velocidad de absorción del mismo. Esto puede ser consecuencia del complejo mecanismo de absorción del aceite en el alimento, que incluye la absorción producida al restablecer la presión atmosférica, y de las bajas temperaturas utilizadas.

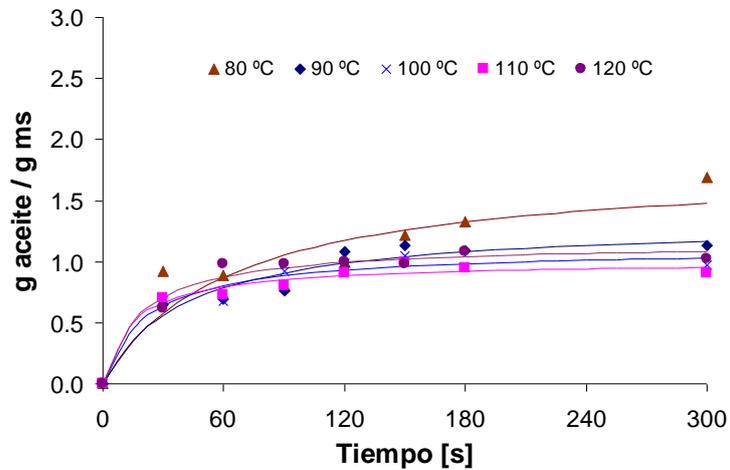


**Figura 5.4.7.** Contenido de aceite de las láminas de manzana  $P = 16.6$  kPa. (Los puntos son los valores calculados a partir de la humedad experimental y las líneas son los obtenidos con el modelo de Monod).

Fritura al vacío



**Figura 5.4.8.** Contenido de aceite de las láminas de manzana  $P = 13.3$  kPa. (Los puntos son los valores calculados a partir de la humedad experimental y las líneas son los obtenidos con el modelo de Monod).



**Figura 5.4.9.** Contenido de aceite de las láminas de manzana  $P = 8$  kPa. (Los puntos son los valores calculados a partir de la humedad experimental y las líneas son los obtenidos con el modelo de Monod).

Una de las principales diferencias observadas entre las láminas de manzana fritas al vacío y a presión atmosférica es la diferente estructura superficial formada durante el proceso. Las observaciones visuales indicaron la existencia de una costra más consistente en las muestras fritas a presión atmosférica. La superficie de las manzanas fritas al vacío presentaba menos expansión y numerosas burbujas pequeñas, al contrario de las sometidas a fritura a presión atmosférica.

Según Kawas y Moreira (2001), la formación de las burbujas en la superficie del producto es el resultado de la expansión del gas en el interior de los poros. Para las muestras procesadas al vacío, una vez que se extraen de la freidora, el vapor de agua en los poros condensa y la estructura se contrae con poca resistencia (ya que no se ha formado la costra al estar a menor temperatura) incluso antes de que el producto se enfríe. Para las muestras procesadas a presión atmosférica, la expansión tiene lugar cuando el producto está inmerso en el aceite. El agua se calienta primero y luego sale en forma de vapor. Conforme se calienta el producto se forma la costra produciendo una barrera a la salida del vapor. Como resultado, se formarán burbujas grandes, pero menos numerosas, en la superficie de los *chips*.

### **5.5. EFECTO DE LAS CONDICIONES DE PROCESO SOBRE LA MICROESTRUCTURA**

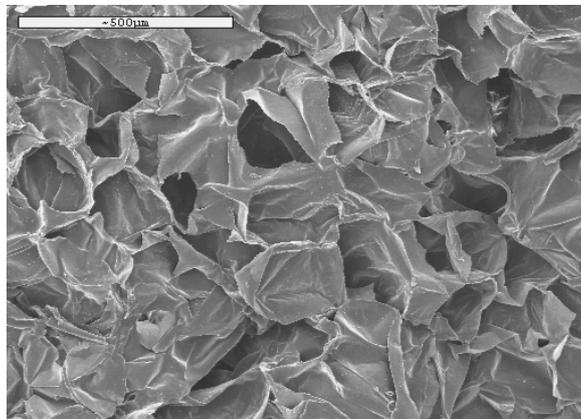
Las observaciones cualitativas visuales comentadas en el apartado anterior deben tener un reflejo en la microestructura del material, por lo que se debería observar diferencias entre los productos fritos a presión atmosférica y subatmosférica. Con dicha finalidad se examinaron microscópicamente muestras de producto obtenidas mediante ambos tipos de procesos.

## Fritura al vacío

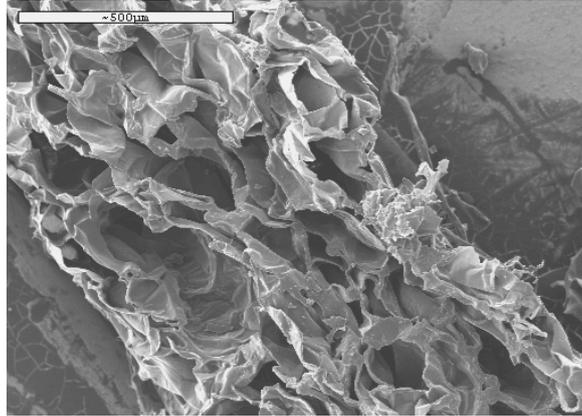
Con este fin se tomaron muestras de manzana fritas a presión atmosférica y a 8 kPa y se prepararon de acuerdo con el procedimiento descrito en el apartado 4.7 para, a continuación, observarlas mediante microscopía electrónica de barrido a baja temperatura (Cryo-SEM).

En las figuras 5.5.1, 5.5.2, 5.5.5 y 5.5.6 se presentan las microfotografías de láminas de manzana fritas a presión atmosférica a 160°C durante 150 s. En las figuras 5.5.3, 5.5.4, 5.5.7 y 5.5.8 se presentan las fotografías de láminas de manzana frita a una presión de 8 kPa, a 100°C durante 300 s. El tiempo para cada condición de proceso es el necesario para conseguir la misma humedad media en los dos casos.

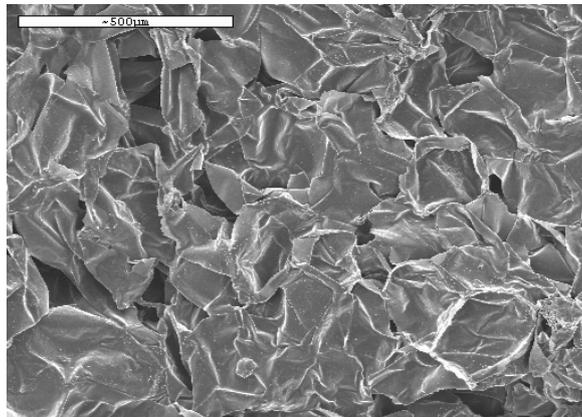
Con el fin de observar con más claridad la estructura de las muestras, una parte de las láminas fritas a las dos condiciones fueron desengrasadas según el procedimiento indicado en el apartado 4.4 antes de ser fotografiadas (Figuras 5.5.1, 5.5.2, 5.5.3 y 5.5.4).



**Figura 5.5.1.** Vista superficial de láminas de manzana frita y desengrasada, con un aumento de 100X. P= 101.3 kPa, T=160°C, t=150 s.



**Figura 5.5.2.** Vista transversal de láminas de manzana frita y desengrasada, con un aumento de 100X. P= 101.3 kPa, T=160°C, t=150 s.

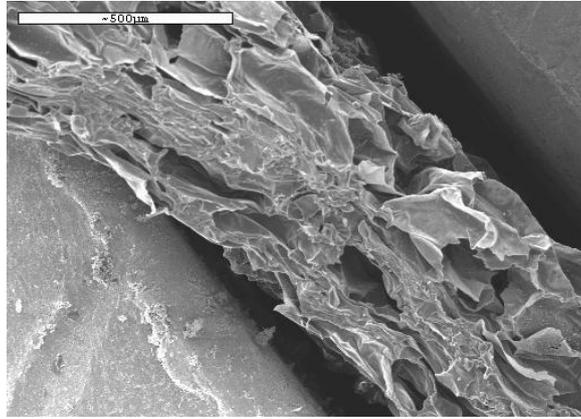


**Figura 5.5.3.** Vista superficial de láminas de manzana frita al vacío y desengrasada, con un aumento de 100X. P= 8 kPa, T=100°C, t=300 s.

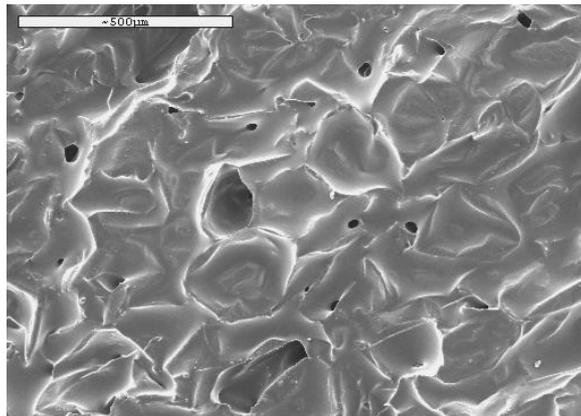
## Fritura al vacío

Al comparar las imágenes de las láminas procesadas a presión atmosférica con las procesadas al vacío ( $P=8$  kPa), se aprecia que difieren en la forma final de la estructura. En la figura 5.5.1, que muestra la superficie de la rodaja frita a presión atmosférica, se observa como el colapso que sufre la estructura es menor comparado con el proceso de fritura al vacío (Figura 5.5.3). Además, las células conservan mejor su forma original poliédrica, propia del tejido de manzana fresca, si bien sus paredes están alabeadas. Por el contrario, las láminas procesadas al vacío presentan una mayor contracción en la superficie, las células han perdido su forma original poliédrica y las paredes celulares están muy deformadas.

Al comparar las microfotografías de la sección transversal de las láminas de manzana frita a presión atmosférica (Figura 5.5.2) y al vacío (Figura 5.5.4), se observa que la estructura de las fritas al vacío presenta un mayor colapso celular, similar a lo descrito para las microfotografías de la superficie de las mismas; además, los espacios intercelulares son más grandes al someter la muestra a fritura a presión atmosférica que al vacío. El mayor encogimiento sufrido por las muestras procesadas a presión subatmosférica se hace más evidente en la microfotografía de la sección transversal (Figura 5.5.4), ya que si bien se parte en ambos casos de muestras del mismo espesor y los aumentos utilizados para tomar la microfotografía son los mismos, el espesor de la sección transversal es menor al procesar a una presión inferior a la atmosférica que cuando se realiza la fritura convencional. Esta imagen es semejante a la reportada por Shyu y Hwang (2001) en las láminas de manzana escaldadas y fritas al vacío.



**Figura 5.5.4.** Vista transversal de láminas de manzana frita al vacío y desengrasada, con un aumento de 100X. P= 8 kPa, T=100°C, t=300 s

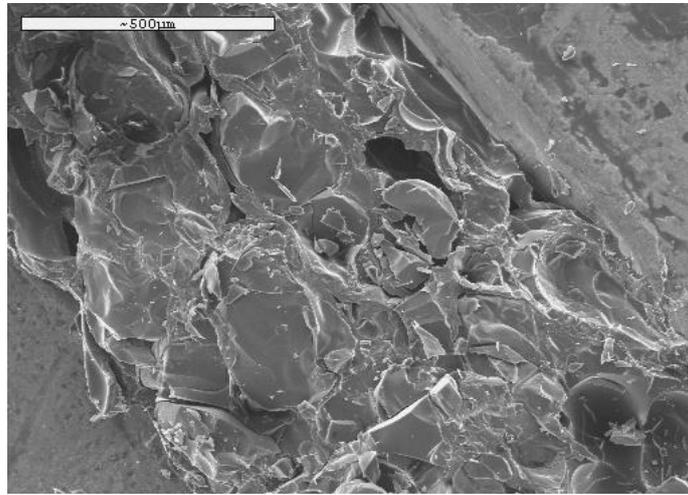


**Figura 5.5.5.** Vista superficial de láminas de manzana frita y sin desengrasar, con un aumento de 100X. P= 101.3 kPa, T=160°C, t=150 s.

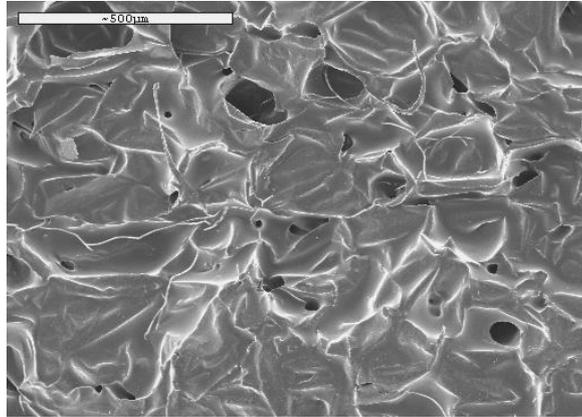
Las otras microfotografías (Figuras 5.5.5, 5.5.6, 5.5.7 y 5.5.8) muestran el brillo característico causado por el aceite embebido en la estructura de estas láminas de manzana. No obstante, también se observa como en las correspondientes a fritura

## Fritura al vacío

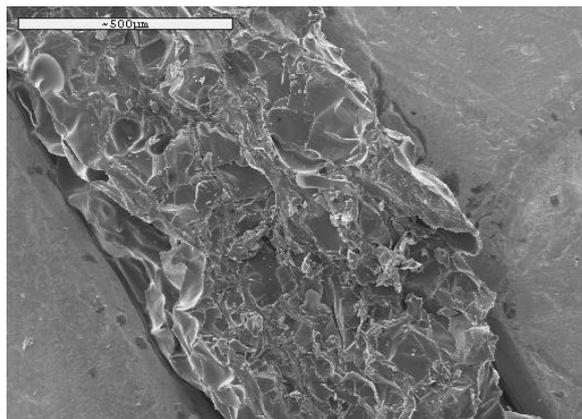
convencional (Figuras 5.5.5 y 5.5.6) el colapso celular es menor que cuando se trabaja en condiciones de presión subatmosférica (Figuras 5.5.7 y 5.5.8), al igual que ocurre con el encogimiento.



**Figura 5.5.6.** Vista transversal de láminas de manzana frita y sin desengrasar, con un aumento de 100X. P= 101.3 kPa, T=160°C, t=150 s.



**Figura 5.5.7.** Vista superficial de láminas de manzana frita al vacío y sin desengrasar, con un aumento de 100X. P= 8 kPa, T=100°C, t=300s.



**Figura 5.5.8.** Vista transversal de láminas de manzana frita al vacío y sin desengrasar, con un aumento de 100X. P= 8 kPa, T=100°C, t=300s.

Debido a la alta temperatura del proceso de fritura a presión atmosférica, en el alimento se produce una costra superficial en cuanto se introduce en el aceite caliente (Fellows, 1998). Esta costra es la que dificulta la salida del agua del

## Fritura al vacío

interior de la rodaja haciendo que el vapor se sobrecaliente y realice una mayor fuerza, dando lugar a poros de mayor tamaño. En cambio, en el proceso al vacío, el agua empieza a salir rápidamente apenas se introduce el alimento en el aceite caliente y, al ser la temperatura de vaporización menor, no transcurre el tiempo necesario para que se forme la costra (Garayo y Moreira, 2002). La superficie de las láminas de manzana procesadas al vacío presentan una imagen parecida a la reportada por Shyu y Hwang (2001) en las láminas de manzana escaldadas y fritas al vacío ( $P=3$  kPa y  $T= 100^{\circ}\text{C}$ ).

Las observaciones realizadas corroboran y ayudan a explicar la menor absorción de aceite en el caso de realizar la fritura al vacío, ya que al estar las células más colapsadas la absorción de aceite se ve dificultada al existir menor espacio para la absorción.

## 6. CONCLUSIONES

Tras el desarrollo del presente trabajo, y después de analizar los resultados obtenidos, se puede extraer las siguientes conclusiones:

- 1.- A partir de la revisión bibliográfica sobre la fritura de alimentos en general y, en especial, sobre el proceso de fritura al vacío se ha observado que todavía no hay disponibles suficientes publicaciones científicas que abarquen todos los aspectos relacionados con este proceso y que permitan comprender bien todos los parámetros implicados en el mismo. De los estudios revisados se desprenden las siguientes afirmaciones.
- 2.- La fritura al vacío actualmente se encuentra en un periodo de expansión y difusión, impulsada por utilizar unas condiciones de temperatura menos rigurosas que en la fritura tradicional. Esto permite que el alimento sufra menos daño térmico y el color y sabor de las frutas y vegetales procesados se conserven mejor.
- 3.- El comportamiento del alimento en cuanto a la eliminación de agua y la absorción de aceite presenta unas características semejantes a las que se producen en la fritura tradicional, y es función de los parámetros temperatura, tiempo de fritura y nivel de vacío.
- 4.- La combinación del tratamiento previo y el posterior aplicado al alimento tienen una gran influencia en la calidad del producto final, color y textura, y en parte ayuda a que disminuya el contenido de aceite al final del proceso. Además, la interacción de las variables propias de la fritura, temperatura y

## Fritura al vacío

vacío, con el pretratamiento que se utilice debe permitir encontrar las condiciones adecuadas para conseguir una calidad óptima.

- 5.- Las condiciones que se utilizan en la fritura al vacío permiten disminuir el contenido de acrilamida en alimentos en que potencialmente se puede generar este tipo de compuesto.
- 6.- Otros aspectos tratados en la revisión bibliográfica han sido el estudio de las cinéticas de la transferencia de materia (agua y aceite) y los métodos utilizados para modelar matemáticamente las mismas. Como se trata de un mecanismo complejo, para describirlo y modelar las cinéticas de transferencia de materia se utilizan varios métodos, tales como empíricos, difusionales, o de frontera móvil. En la literatura revisada no se estudia el modelado de la fritura al vacío.

### Implementación del sistema de fritura al vacío

- 7.- Se ha diseñado y construido un sistema de fritura al vacío que ha permitido ejecutar las experiencias de fritura a diferentes condiciones de presión y de temperatura.
- 8.- El sistema consta de las siguientes partes principales: freidora, cámara de vacío, bomba de vacío y controles de temperatura y presión.
- 9.- El sistema de control de temperatura de este sistema de fritura al vacío, mantiene estable la temperatura de fritura, en  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , durante el tiempo de proceso.
- 10.- El sistema controlador de la presión (manómetro digital, electroválvula y bomba de vacío) responde adecuadamente a los requerimientos del sistema; además mantiene estable la presión en un intervalo de  $\pm 0.2$  kPa (mínima resolución del controlador) durante el desarrollo de las experiencias de fritura.

- 11.- El aparato diseñado y puesto a punto permite realizar experiencias a tiempos cortos, lo que ha permitido determinar las cinéticas de fritura al vacío.
- 12.- Es factible construir equipos a escala de laboratorio de bajo coste que respondan a los requerimientos necesarios para poder realizar estudios de cinéticas de transferencia de materia en fritura a presión subatmosférica.

Cinéticas de pérdida de agua

- 13.- Las curvas de pérdida de agua en la fritura a presión atmosférica, presentan la forma de las curvas típicas de secado en su etapa de velocidad decreciente; en este caso, el aparato experimental no permite apreciar la existencia de un periodo de velocidad constante, dada la rápida velocidad de pérdida de agua.
- 14.- En el proceso de fritura al vacío, las curvas de pérdida de agua presentan la forma típica de las de secado en el período decreciente, de forma semejante a las obtenidas a presión atmosférica y a las reportadas en la literatura para fritura al vacío.
- 15.- Independientemente de la presión, cuando la temperatura aumenta, se incrementa la velocidad de secado y, por tanto, disminuye el tiempo de fritura.
- 16.- Se aprecia también que a una determinada temperatura, cuanto menor es la presión, la velocidad de evaporación aumenta y, por tanto, mayor es la velocidad de secado.
- 17.- Disminuyendo la presión suficientemente, se pueden alcanzar velocidades de fritura semejantes a las obtenidas en el proceso convencional a presión atmosférica, pero utilizando temperaturas más bajas.

Fritura al vacío

Determinación de los coeficientes de difusión y la energía de activación.

- 18.-** Se ha empleado un modelo difusivo para una lámina infinita para modelar las cinéticas de pérdida de agua en los dos tipos de proceso, a presión atmosférica y al vacío. Los valores experimentales y los calculados muestran una buena correlación (% var > 99%), por lo tanto, la solución de la segunda ley de Fick para una geometría plana infinita describe satisfactoriamente la pérdida de agua en este proceso, en las condiciones estudiadas.
- 19.-** En la fritura a presión atmosférica se ha observado que los valores de difusividad efectiva determinados para láminas de manzana son superiores a los reportados en la literatura para otros procesos de deshidratación u otro tipo de material frito. No obstante, se encuentran dentro del intervalo general de  $10^{-9}$  y  $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  para deshidratación de alimentos.
- 20.-** Al aumentar la temperatura a una presión subatmosférica determinada, los valores de difusividad aumentan. Además, para una misma temperatura, al aumentar la presión disminuye la difusividad. Se ha observado que la relación entre la presión y la difusividad a temperatura constante viene dada por una función potencial del tipo:  $D_{\text{eff}} = a \cdot P^{-n}$ . El hecho de que esta proporcionalidad sea potencial podría atribuirse a la resistencia que presenta la matriz sólida del alimento a la transferencia de humedad.
- 21.-** Al representar  $k \cdot \Delta T$  frente a  $D_{\text{eff}}$  los puntos están alineados, lo cual indica una proporcionalidad directa entre transferencia de calor y transferencia de materia, evidenciándose una buena concordancia entre el modelo de pérdida de humedad y la transferencia de calor.
- 22.-** La influencia de la temperatura en la difusividad efectiva se ha explicado mediante la ecuación de Arrhenius, tanto para el proceso de fritura a presión atmosférica como subatmosférica. Donde el logaritmo de la difusividad ha

mostrado una tendencia lineal frente a la inversa de la temperatura absoluta, ( $r^2 = 0.99$ ). A partir de estos resultados se han calculado los valores de la energía de activación. No se observaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre los valores de  $E_a$  obtenidos.

- 23.-** En cuanto a los valores de energía de activación calculados para las láminas de manzana, se ha observado que son menores que los obtenidos por otros autores, tanto para manzana deshidratada como para fritura de otros productos. Esto indicaría una mayor facilidad en la extracción del agua en la fritura, comparado con otros procesos de deshidratación.
- 24.-** Para comprobar la validez del modelo propuesto se han realizado experiencias con láminas de un espesor de 5 mm. Al representar la humedad adimensional calculada utilizando la  $D_{eff}$  obtenida para las láminas de 2 mm frente a la obtenida experimentalmente, los puntos están alineados ( $r^2 = 0.98$ ), lo cual indica la validez del modelo de pérdida de humedad, que es independiente del espesor de la muestra. Además, cabe señalar que los datos experimentales obtenidos en estas experiencias no fueron utilizados en la identificación paramétrica, lo cual es un indicador también de la bondad del modelo utilizado.

### Absorción de aceite durante la fritura

- 25.-** Durante la fritura a presión atmosférica, al aumentar la temperatura el contenido de aceite también se incrementa. Esto podría atribuirse a que al formarse una costra con mayor rapidez quedaría un mayor espacio intercelular que pasaría a ser ocupado por el aceite.
- 26.-** Cuando se procesa a presión subatmosférica y se varía la temperatura, no existe una clara diferencia en el contenido final de aceite de las muestras. Transcurridos los primeros segundos de fritura, se observa que se estabiliza

## Fritura al vacío

la absorción de aceite en un valor inferior al obtenido por fritura a presión atmosférica. En este caso cabe pensar que al trabajar a temperaturas menores, la formación de la costra tarda en aparecer o bien no se forma.

- 27.-** En cuanto al efecto de la presión, de manera general se observa que a presión subatmosférica el contenido de aceite disminuye comparado con las láminas procesadas a presión atmosférica.
- 28.-** No obstante, hay que señalar que si bien la pérdida de agua y la absorción de aceite están relacionadas, el contenido final de aceite no se corresponde bien con la cantidad total de agua perdida de la muestra.

## Microestructura

- 29.-** Al comparar las imágenes obtenidas al microscopio de las láminas procesadas a presión atmosférica con las procesadas al vacío ( $P=8$  kPa), se aprecia que difieren en la forma final de la estructura. A presión atmosférica, el colapso que sufre la estructura es menor comparado con el provocado por el proceso de fritura al vacío. Además, las células conservan mejor su forma original poliédrica, propia del tejido de manzana fresco, si bien sus paredes están alabeadas. Por el contrario, las láminas procesadas al vacío presentan una superficie que tiene una mayor contracción, las células han perdido su forma original poliédrica y las paredes celulares están muy deformadas.
- 30.-** Al comparar las microfotografías de la sección transversal de las láminas de manzana frita a presión atmosférica y al vacío, se observa que la estructura de las fritas al vacío presenta un mayor colapso celular, similar a lo observado en las microfotografías de la superficie; además, los espacios intercelulares son más grandes al someter la muestra a fritura a presión atmosférica que al vacío. El espesor de la sección transversal es menor al

procesar a una presión inferior a la atmosférica que cuando se realiza la fritura convencional.

- 31.-** Estas observaciones ayudan a explicar la menor absorción de aceite en el caso de realizar la fritura al vacío, ya que al estar las células más colapsadas la absorción de aceite se ve dificultada al existir menor espacio para la absorción.

Global

- 32.-** El proceso de fritura al vacío parece tener el mismo comportamiento que la fritura a presión atmosférica. Esto puede deducirse porque se obtuvieron valores de  $D_{eff}$  y  $E_a$ , del mismo orden cuando se realizaron experiencias a presión atmosférica y cuando se trabajó a presión subatmosférica y a temperaturas más bajas.
- 33.-** La fritura al vacío se presenta como una alternativa frente a la fritura tradicional en la elaboración de alimentos fritos. Es muy importante continuar con los estudios pertinentes para ampliar los conocimientos de este proceso y, en consecuencia, aportar datos científicos que permitan comprender y mejorar la situación tecnológica actual en este campo.



## 7. RECOMENDACIONES

A partir del presente trabajo y de los resultados obtenidos, se sugieren las siguientes recomendaciones para continuar profundizando en el proceso de fritura al vacío:

1. Complementar el sistema de fritura al vacío con la incorporación de una centrífuga para eliminar el aceite superficial y disminuir así aún más el contenido final en aceite de los productos.
2. Complementar el estudio del efecto de la presión con mayor número de experiencias a presión atmosférica.
3. Estudiar la cinética de absorción de aceite con detalle.
4. Estudiar el efecto de pretratamientos en la cinética de deshidratación.
5. Estudiar el efecto de pretratamientos en la cinética de absorción de aceite.
6. Determinar el efecto de las condiciones de proceso sobre los posibles cambios nutricionales.
7. Determinar las condiciones óptimas de temperatura y vacío para obtener un producto comercial.
8. Evaluar sensorialmente los productos obtenidos.



## 8. NOMENCLATURA

A	Constante de relación de la ecuación 4.6.2.1
a	Constante de relación de las Ecuaciones 1.3.1.1 y 1.3.1.2
B	Constante de relación de la ecuación 4.6.2.1
b	Constante de relación de las Ecuaciones 1.3.1.1 y 1.3.1.2
bh	Base húmeda
bs	Base seca
c	compartimiento interno ( <i>core</i> )
k	constante de relación (recíproca de $\tau$ ), Ec. 1.3.1.6
$D_0$	Factor preexponencial en la ecuación de Arrhenius [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]
$D_{\text{eff}}$	Coefficiente de difusividad efectiva [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]
$E_a$	Energía de activación [ $\text{kJ mol}^{-1}$ ]
$k_v$	Conductividad del vapor del agua.
$K_X$	Constante de relación de pérdida de agua [ $\text{min}^{-1}$ ], Ec. 1.3.1.7
$K_Y$	Constante de relación de absorción de aceite [ $\text{min}^{-1}$ ]. Ec. 1.3.5.1
l	Semiespesor de la lámina [m]
n	valor medio del exponente en la ecuación 6.3.2.1
P	Presión
R	Constante de los gases perfectos [ $8.31441 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]
$r^2$	Coefficiente de correlación
$S_y$	Desviación estándar de la muestra

## Fritura al vacío

$S_{yx}$	Desviación estándar de la estimación
$t$	Tiempo
$T$	Temperatura
$W$	Contenido de humedad media [kg agua . kg <sup>-1</sup> ss]
$W_0$	Contenido de humedad media inicial [kg agua . kg <sup>-1</sup> ss]
$W_e$	Contenido de humedad media en el equilibrio [kg agua . kg <sup>-1</sup> ss]
$W_t$	Contenido de humedad [kg agua . kg <sup>-1</sup> ss]
$x$	Distancia respecto al eje x [m]
$X$	Contenido de humedad [g/100g bh]
$Y_e$	Contenido de aceite [kg/kg bs], en el equilibrio
%var	Porcentaje de varianza
$\alpha$	fracción inicial de agua del compartimiento interno, Ec. 1.3.1.6
$\beta$	constante de retraso, Ec. 1.3.1.6
$\tau$	constante de tiempo del compartimiento, Ec. 1.3.1.6
$\Psi$	Humedad media adimensional
$\Psi_{calculada}$	humedad adimensional calculada
$\Psi_{experimental}$	humedad adimensional experimental

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Ahn, J. S., Castle, L., Clarke, D. B., Lloyd, A. S., Philo, M. R. y Speck, D. R. (2002). Verification of the findings of acrylamide in heated foods. *Food Additives and Contaminants*, 19(12), 1116-1124.

Alimentatec. Portal de tecnologías y mercados del sector alimentario (2006). Situación actual y tendencias en el mercado de los *Snacks*. En: <http://www.alimentatec.com/muestrapaginas.asp?nodo1=89&nodo2=0&idcontenido=553&content=18>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2008

AOAC (1997). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Arlington, USA

Araki, T., Sagara, Y., Abdullah, K. y Tambunan, A. H. (2001). Transport properties of cellular food materials undergoing freeze-drying. *Drying Technology*, 19(2), 297-312.

Baik, O.-D. y Mittal, G. S. (2005). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. *Food research International*, 38, 183-191.

Banga, J. R., Balsa-Canto, E., Moles, C. G. y Alonso, A. A. (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 131-144.

Banga, J. R. y Singh, P. R. (1994). Optimization of Air Drying of Foods. *Journal of Food Engineering*, 23, 189-211.

## Fritura al vacío

- Baumann, B. y Escher, F. (1995). Mass and heat transfer during deep-fat frying of potato slices, rate of drying and oil uptake. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 28, 395-403.
- Benedito, J., García-Pérez, J. V., Dobarganes, C. M. y Mulet, A. (2007). Rapid evaluation of frying oil degradation using ultrasonic technology. *Food research International*, 40, 406-414.
- Blasco, M., Garcia-Pérez, J.-V., Bon, J., Carreres, J.-E. y Mulet, A. (2006). effect of blanching and air flow rate on turmeric drying. *Food Science and Technology International*, 12(4), 315-323.
- Bon, J., Simal, S., Rosselló, C. y Mulet, A. (1997). Drying Characteristics of Hemispherical Solids. *Journal of Food Engineering*, 34, 109-122.
- Bouchon, P. y Pyle, D. L. (2005). Modelling oil Absorption during Post-frying cooling I: Model Development. *Food and Bioproducts Processing*, 83(C4), 253-260.
- Budzaki, S. y Seruga, B. (2005). Moisture loss and oil uptake during deep fat frying of "krostula" dough. *European Food Research and Technology*, 220, 90-95.
- Costa, R. M. y Oliveira, F. A. R. (1999). Modelling the kinetics of water loss during potato frying with a compartmental dynamic model. *Journal of Food Engineering*, 41, 177-185.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of Diffusion*. Oxford Univ. Press.Londres, England.
- Chen, Y. y Moreira, R. G. (1997). Modelling of a Batch Deep-Fat Frying Process for Tortilla Chips. *Food and Bioproducts Processing*, 75(3), 181-190.

- Chou, S. K. y Chua, K. J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 12, 359-369.
- Dobarganes, C., Márquez-Ruiz, G. y Velasco, J. (2000). Interactions between fat and food during deep-frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102, 521-528.
- Eshtiaghi, M. N., Stute, R. y Knorr, D. (1994). High-pressure and freezing pre-treatment effects on drying, dehydration, texture and color of green beans, carrots and potatoes. *Journal of Food Science*, 59, 1168-1170.
- Farid, M. (2001). A unified approach to the heat and mass transfer in melting, solidification, frying and different drying processes. *Chemical Engineering Science*, 56, 5419-5427.
- Farid, M. (2002). The moving boundary problems from melting and freezing to drying and frying of food. *Chemical engineering and Processing*, 41, 1-10.
- Farid, M. M. y Chen, X. D. (1998). The analysis of heat and mass transfer during frying of food using moving boundary solution procedure. *Heat and Mass Transfer*, 34(69-77).
- Farkas, B. E., Singh, R. P. y Rumsey, T. (1996a). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I. Model Development. *Journal of Food Engineering*, 29, 211-226.
- Farkas, B. E., Singh, R. P. y Rumsey, T. (1996b). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. II. Model Solution and verification. *Journal of Food Engineering*, 29, 227-248.
- Fellows, P. J. (1998). Frying. In: P. J. Fellows, *Food processing technology. Principles and practice* (pp. 355-362). New York: Woodhead.

Fritura al vacío

Gamble, M. H., Rice, P. y Selman, J. D. (1987). Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record U.K. tubers. *International Journal of Food Science and Technology*, 22, 233-241.

Garayo, J. y Moreira, R. (2002). Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 181-191.

García, M. A., Ferrero, C., Bértola, N., Martino, M. y Zaritzky, N. (2002). Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. *Innovative Foods Science and Emerging Technologies*, 3, 391-397.

Gertz, C. y Klostermann, S. (2004). Analysis of acrylamide and mechanisms of its formation in deep-fried products. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 104, 762-771.

Granda, C. y Moreira, R. G. (2005). Kinetics of acrylamide formation during traditional and vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Process Engineering*, 28, 478-493.

Granda, C., Moreira, R. G. y Tichy, S. E. (2004). Reduction of acrylamide formation in potato chips by low-temperature vacuum frying. *Journal Food Science*, 69(8), E405-E411.

Kawamura, T. (1987). Method of manufacturing dried food and plant products. *Patent*. EU.

Kawas, M. L. y Moreira, G. R. (2001). Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *Journal of Food Engineering*, 47, 97-107.

Kitson, J. A., Lackey, C. L. y Wright, H. T. (1997). New fruit flavor snack. *Food Engineering*, 44(11), 50-51.

- Kochhar, S. P. y Gertz, C. (2004). New theoretical and practical aspects of the frying process. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 106, 722-727.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B. y Marinos-Kouris, D. (2000). Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44, 39-46.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B. y Marinos-Kouris, D. (2001). Colour changes during deep fat frying. *Journal of Food Engineering*, 48, 219-225.
- Liu-Ping, F., Min-Zhang, Gong-Nian, X., Jin-Cai, S. y Qian-Tao (2005a). The optimization of vacuum frying to dehydrate carrot chips. *International Journal of Food Science and Technology*, 40, 911-919.
- Liu-Ping, F., Min-Zhang y Mujumdar, A. S. (2005b). Vacuum Frying of Carrot Chips. *Drying Technology*, 23, 645-656.
- Liu-Ping, F., Min, Z. y Mujumdar, A. S. (2007). Storage stability of carrot chips. *Drying Technology*, 25(7-9), 1537-1543.
- Liu-Ping, F., Zhang, M. y Mujumdar, A. S. (2006). Effect of various Pretreatments on the Quality of Vacuum-fried Carrot chips. *Drying Technology*, 24, 1481-1486.
- Math, R. G., Velu, V., Nagender, A. y Rao, D. G. (2004). Effect of frying conditions on moisture, fat and density of *papad*. *Journal of Food Engineering*, 64(429-434).
- Mellema, M. (2003). Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 364-373.

## Fritura al vacío

- Mittal, G. S. y Zhang, J. (2000). Use of artificial neural network to predict temperature, moisture, and fat in slab-shaped foods with edible coatings during deep-fat frying. *Journal of Food Science*, 65(6), 978-983.
- Mittal, G. S. y Zhang, J. (2001). Artificial neural network for the prediction of temperature, moisture and fat contents in meatballs during deep-fat frying. *International Journal of Food Science and Technology*, 36, 489-497.
- Moreira, R. G. (2001). Deep-Fat Frying of Foods. In: J. Irudayaraj, *Food Processing Operations Modeling* (pp. 115-146). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Moreira, R. G., Palau, J. E. y X., S. (1995). Deep-fat frying of tortilla chips: An engineering approach. *Food Technology, April*, 146-150.
- Moyano, P. C. y Berna, A. Z. (2002). Modeling water loss during frying of potato strips: Effect of solute impregnation. *Drying Technology*, 20(7), 1303-1318.
- Moyano, P. C. y Pedreschi, F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 39, 285-291.
- Mulet, A. (1994). Drying modelling and Water Diffusivity in Carrots and Potatoes. *Journal of Food Engineering*, 22, 329-348.
- Ngadi, M. O., Watts, K. C. y Correia, L. R. (1997). Finite element method modelling of moisture transfer in chicken drum during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 32, 11-20.
- Nielsen, J. (2006). Microbial process kinetics. In: C. R. B. Kristiansen, *Basic Biotechnology* (pp. 163-165). Cambridge: Cambridge University Press.

## Bibliografía

- Pedreschi, F., Hernández, P., Figueroa, C. y Moyano, P. (2005a). Modeling water loss during frying of potato slices. *International Journal of Food Properties*, 8, 289-299.
- Pedreschi, F. y Moyano, P. (2005a). Effect of pre-drying on texture and oil uptake of potato chips. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 38, 599-604.
- Pedreschi, F. y Moyano, P. (2005b). Oil uptake and texture development in fried potato slices. *Journal of Food Engineering*, 70(4), 557-563.
- Pedreschi, F. Moyano, P., Kaach, K., y Granby, K. (2005b). Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. *Food research International*, 38, 1-9.
- Prothon, F. (2003). Combined dehydration methods. From fresh fruit to high-quality ingredients. Ph.D. Thesis. Lund University. Lund, Sweden.
- Reid, R. C., Prausnitz, J. M. y Shewood, T. K. (1997). *The properties of gases and liquids*. McGraw Hill.USA
- Rimac, S., Lelas, V., Rade, D. y Simundié, B. (2004). Decreasing of oil absorption in potato strips during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 64, 237-241.
- Sacilik, K. y Elicin, A. K. (2006). The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73(3), 281-289.
- Saguy, I. S. y Dana, D. (2003). Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*, 56, 143-152.

Fritura al vacío

Saguy, I. S. y Pinthus, E. J. (1995). Oil uptake during deep-fat frying: Factors and mechanism. *Food Technology, April.*, 142-145.

Sahin, S. (2000). Effect of frying parameters on the colour development of fried potatoes. *European Food Research and Technology*, 211, 165-168.

Sahin, S., Sastry, S. K. y Bayindirli, L. (1999a). The determination of convective heat transfer coefficient during frying. *Journal of Food Engineering*, 39, 307-311.

Sahin, S., Sastry, S. K. y Bayindirli, L. (1999b). Heat transfer during frying of potato slices. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 32, 19-24.

Saravacos, G. D. y Maroulis, Z. A. (2001). *Transport properties of foods*. Marcel Dekker, Inc. New York, USA.

Shyu, S.-L., Hau, L.-B. y Hwang, L. S. (2005). Effects of processing conditions on the quality of vacuum-fried carrot chips. *Journal of the Science of the Food and Agriculture*, 85, 1903-1908.

Shyu, S.-L. y Hwang, L. S. (2001). Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried apple chips. *Food research International*, 34, 133-142.

Sijbring, P. H. (1969). Principles and practical results of vacuum frying chips. *Conserva*, 18(4), 99-101.

Simal, S., Deyá, E., Frau, M. y Rosselló, C. (1997). Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-hydrated apple cubes. *Journal of Food Engineering*, 33, 139-150.

Simal, S., Rosselló, C., Berna, A. Z. y Mulet, A. (1998a). Drying of Shrinking cylinder-shaped bodies. *Journal of Food Engineering*, 37, 423-435.

## Bibliografía

- Simal, S., Rosselló, C. y Mulet, A. (1998b). Modelling of air drying in regular shaped bodies. *Trends in Chemical Engineering*, 4, 171-180.
- Singh, R. P. (1995). Heat and Mass Transfer in Foods During Deep-Fat Frying. *Food Technology*, April, 134-137.
- Singh, R. P. (2000). Moving Boundaries in Food Engineering. *Food Technology*, 54(2), 44-53.
- Smith, M. C. y Farid, M. (2004). A single correlation for the prediction of dehydration time in drying and frying f samples having different geometry and size. *Journal of Food Engineering*, 63, 265-271.
- Stier, R. F. (2004). Frying as a science - An introduction. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 106, 715-721.
- Tan, K. J. y Mittal, G. S. (2006). Physicochemical properties changes of donuts during vacuum frying. *Intenational journal of Food Properties*, 9, 85-98.
- Tangduangdee, C., Bhumiratana, S. y Tia, S. (2003). Heat and mass transfer during deep-fat frying of frozen composite foods with thermal protein denaturation as quality index. *ScienceAsia*, 29, 355-364.
- Toledo, R. (1991). *Fundamentals of food process engineering*. Van Nostrand Reinhold Company, Inc. New York
- Tungangprateep, S. y Jindal, V. K. (2004). Sorption isotherms and moisture diffusivity in fried cassava-shrimp chips. *International Journal of Food Properties*, 7(2), 215-227.

Fritura al vacío

Varela, G., Bender, A. E. y Morton, I. D. (1998). *Frying of Food: Principles, Changes, New Approaches*. Ellis Horwood Series in Food Science and Technology. VCH Publishers. Chichester, U.K.

Velic, D., Planinic, M., Tomas, S. y Bilic, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64(1), 97-102.

Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G. y Raoult-Wack, A.-L. (2002). Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*, 53, 161-176.

Vitrac, O., Trystram, G. y Raoult-Wack, A.-L. (2000). Deep-fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102, 529-538.

Yamsaengsung, R. y Moreira, R. G. (2002a). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying. Part I. Model development. *Journal of Food Engineering*, 53, 1-10.

Yamsaengsung, R. y Moreira, R. G. (2002b). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying. Part II. Model solution & validation. *Journal of Food Engineering*, 53, 11-25.

Yamsaengsung, R. y Rungsee, C. (2006). Modeling the heat and mass transfer during the vacuum frying of chips. En:  
[http://161.246.48.249/rsce2004/SharedDocs/paper\\_file/HS-117/hs-117\\_RSCE%202004%20Full%20Paper%20\(Modeling%20Vacuum%20Frying\)](http://161.246.48.249/rsce2004/SharedDocs/paper_file/HS-117/hs-117_RSCE%202004%20Full%20Paper%20(Modeling%20Vacuum%20Frying).pdf)  
.pdf. Fecha de consulta: 20/12/2008

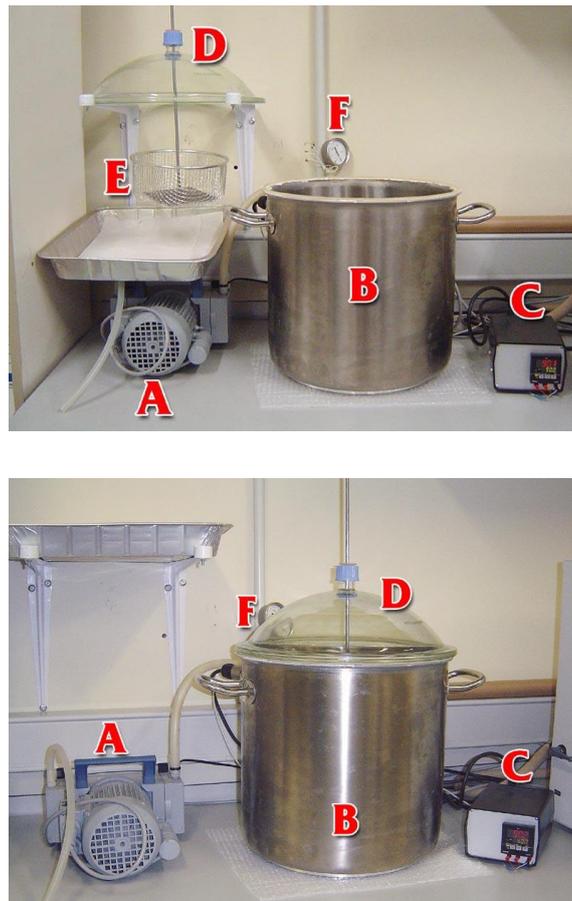
## 10. ANEXOS

### ANEXO 1. APARATO EXPERIMENTAL. CONSTRUCCIÓN



**Figura 1.1.** Fotografías de la cámara de vacío donde se introduce el recipiente de fritura con el aceite y algunos elementos adicionales.

## Fritura al vacío



**Figura 1.2.** Bomba de vacío (A), cámara de vacío (B), controlador de temperatura (C), con tapa de vidrio (D), porta muestras (E) y manómetro (F).

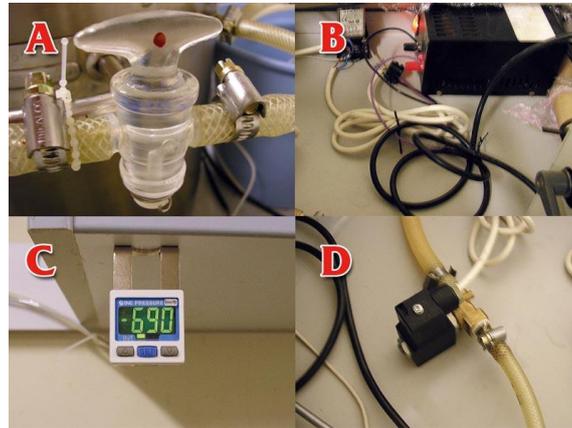


**Figura 1.3.** Placa calefactora eléctrica colocada dentro de la cámara de vacío.



**Figura 1.4.** Recipiente de fritura, con aceite y el sensor de temperatura, colocada dentro de la cámara de vacío.

Fritura al vacío



**Figura 1.5.** Válvula para romper el vacío (A), fuente de energía (B), controlador y regulador de la presión (C) y electroválvula (D).



**Figura 1.6.** Trampas de vapor (A, B).



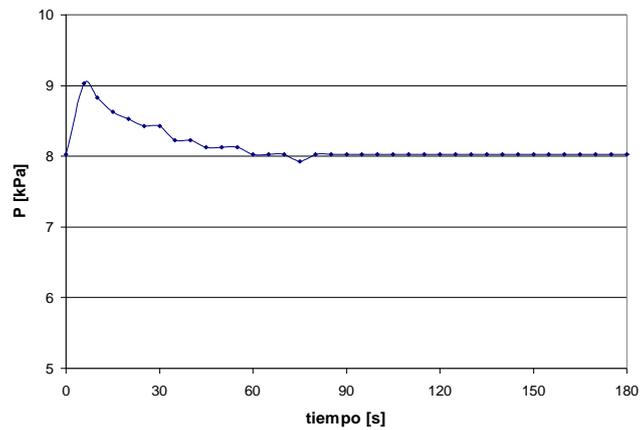
**Figura 1.7.** La tapa y el portamuestras con láminas de manzana.



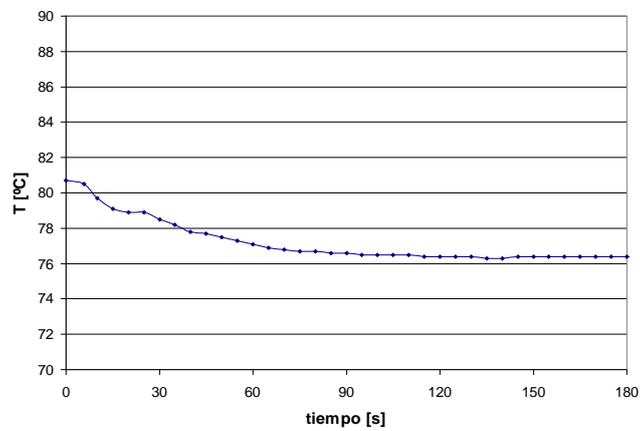
**Figura 1.8.** Equipo de fritura al vacío durante el proceso.

Fritura al vacío

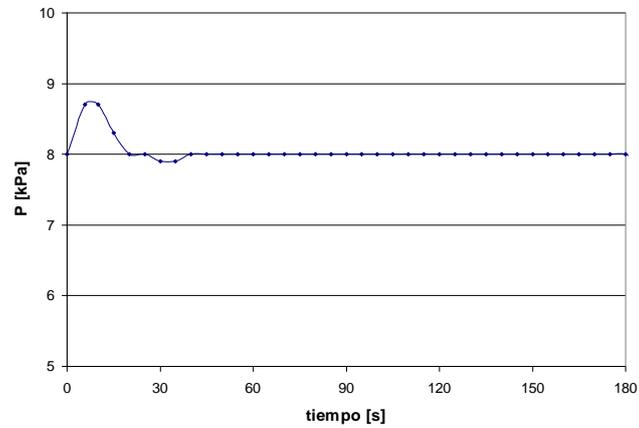
## ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN DEL APARATO EXPERIMENTAL



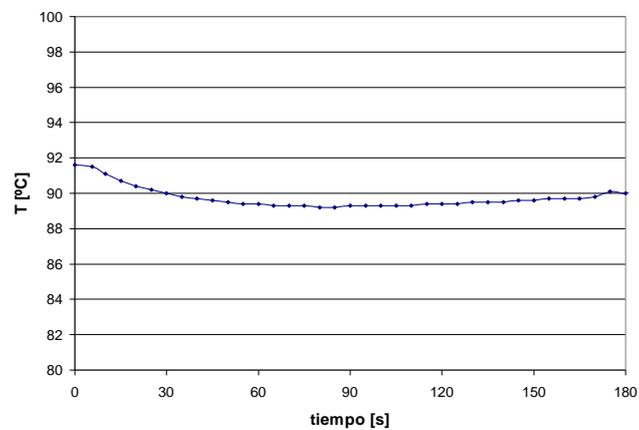
**Figura 2.1.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana (25g). Consigna:  $P = 8 \text{ kPa}$  y  $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Figura 2.2.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $P = 8 \text{ kPa}$ .

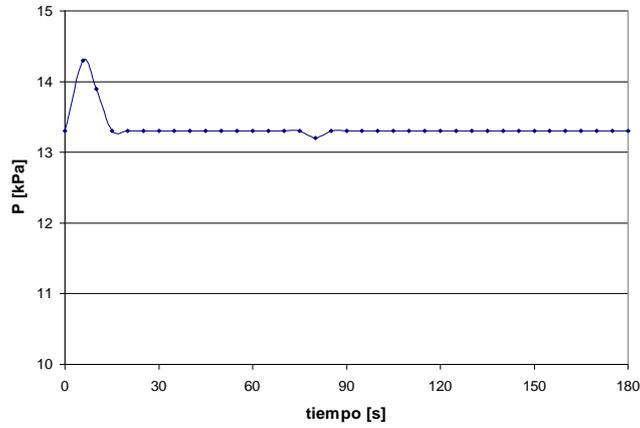


**Figura 2.3** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 8 \text{ kPa}$  y  $T = 90^\circ\text{C}$ .

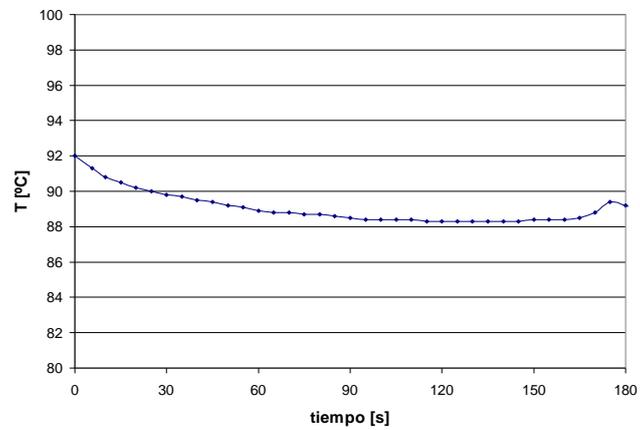


**Figura 2.4.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $P = 8 \text{ kPa}$ .

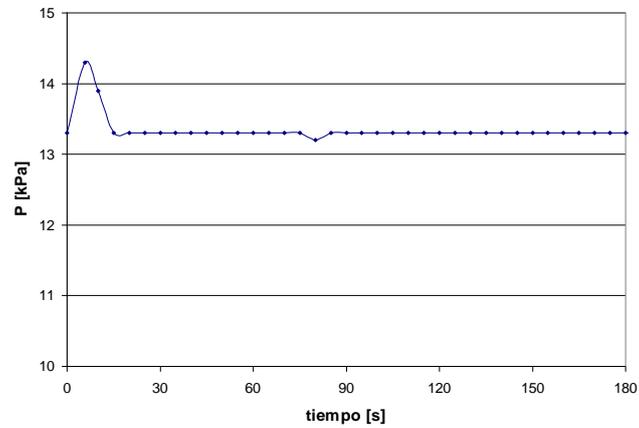
## Fritura al vacío



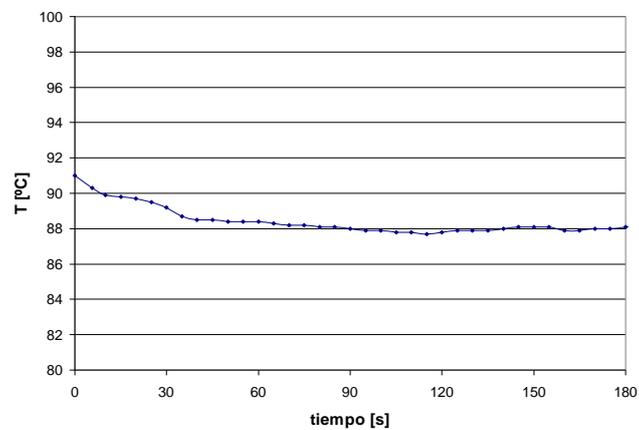
**Figura 2.5.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 13.3$  kPa y  $T = 90^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 2.6.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 90$  °C y  $P = 13.3$  kPa.

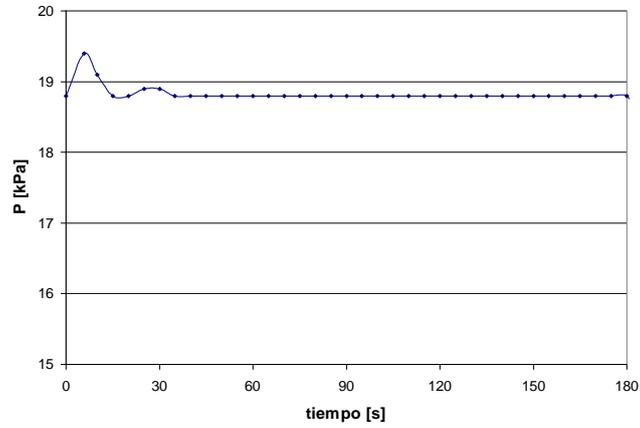


**Figura 2.7.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 13.3$  kPa y  $T = 90$  °C.

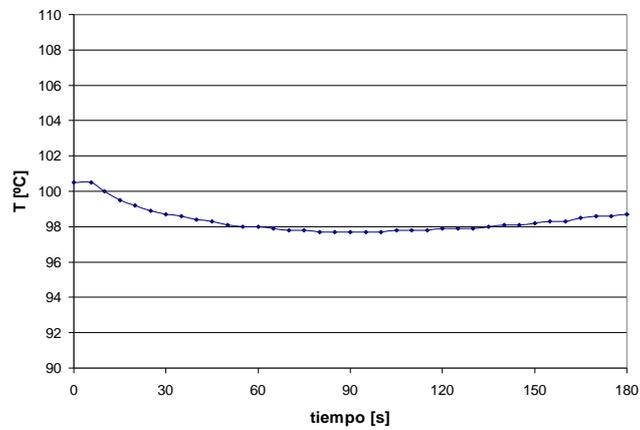


**Figura 2.8.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 90$  °C y  $P = 18.6$  kPa.

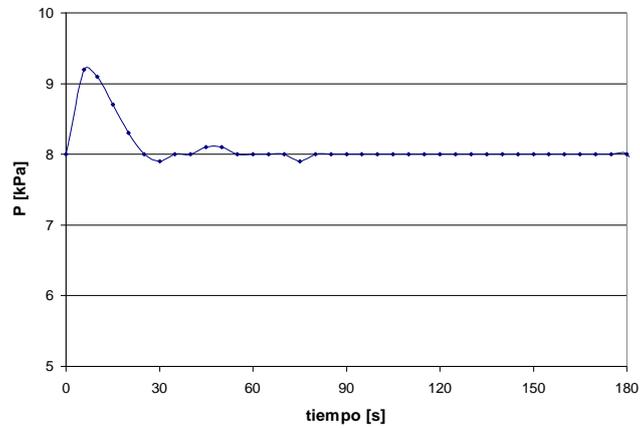
Fritura al vacío



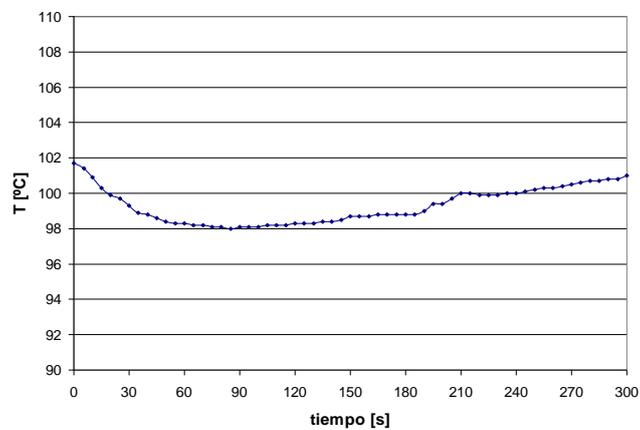
**Figura 2.9.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 18.6$  kPa y  $T = 90$  °C.



**Figura 2.10.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 100$  °C y  $P = 8$  kPa.

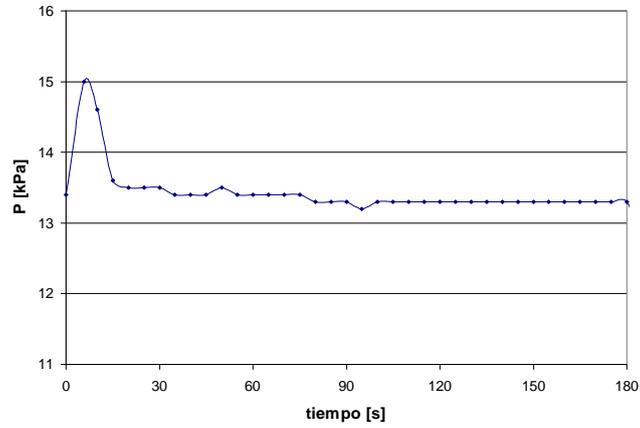


**Figura 2.11.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 8 \text{ kPa}$  y  $100^\circ\text{C}$ .

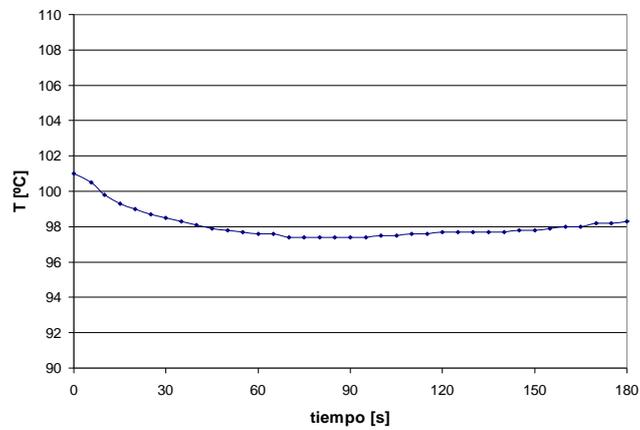


**Figura 2.12.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $P = 13.3 \text{ kPa}$ .

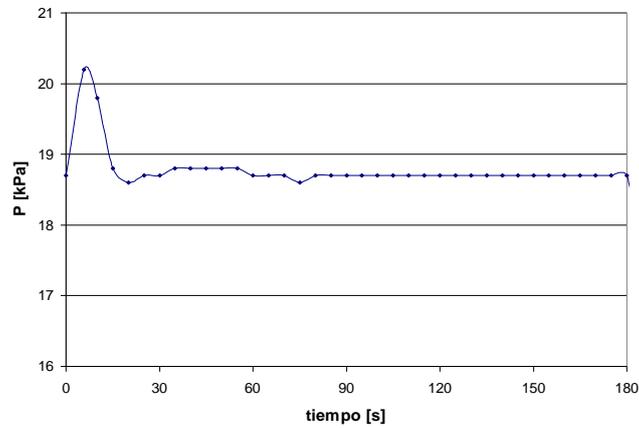
## Fritura al vacío



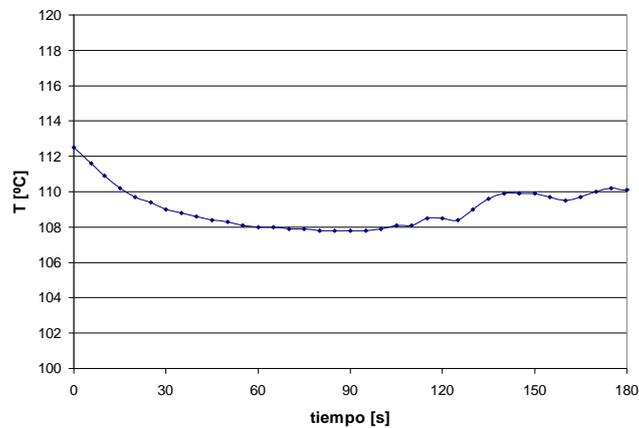
**Figura 2.13.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 13.3$  kPa y  $T = 100^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 2.14.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 100^{\circ}\text{C}$  y  $P = 18.6$  kPa.

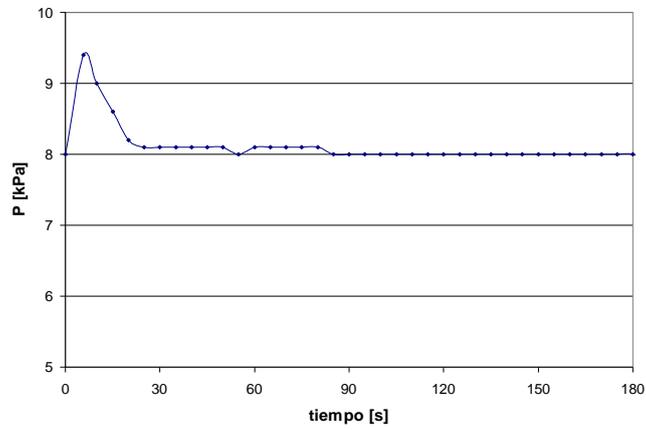


**Figura 2.15.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 18.6 \text{ kPa}$  y  $P = 100^\circ\text{C}$ .

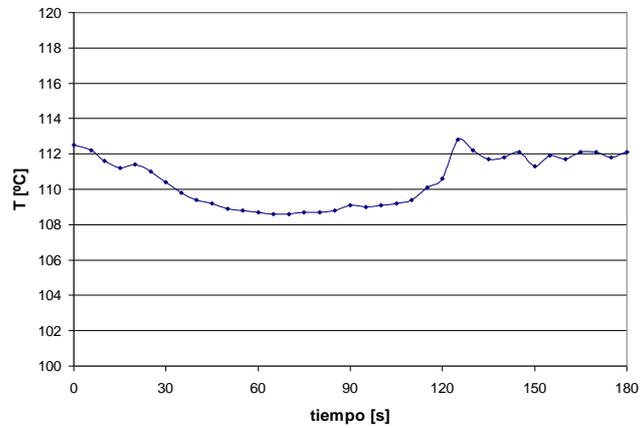


**Figura 2.16.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $P = 8 \text{ kPa}$ .

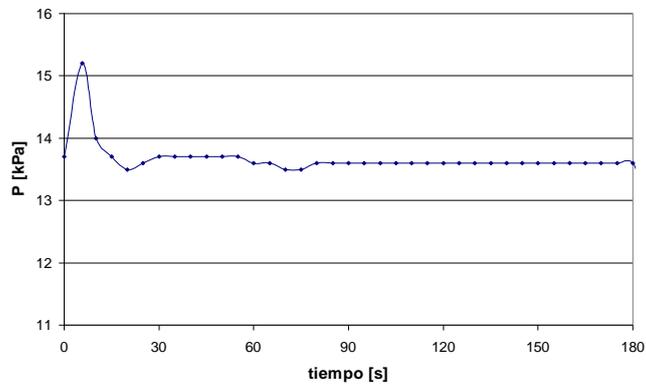
## Fritura al vacío



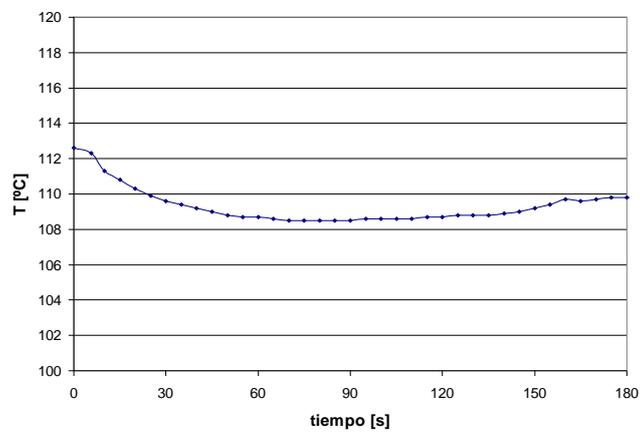
**Figura 2.17.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 8 \text{ kPa}$  y  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Figura 2.18.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $P = 13.3 \text{ kPa}$ .

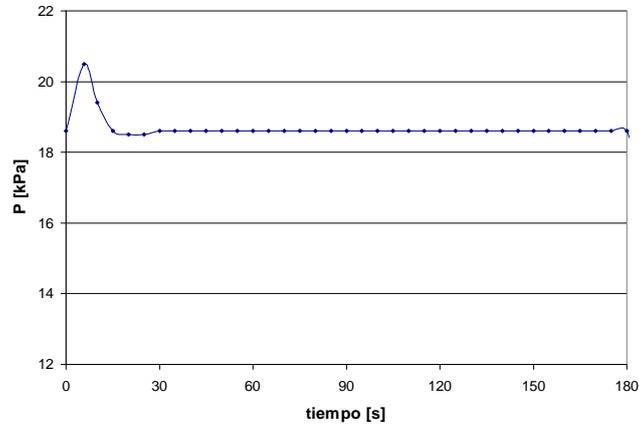


**Figura 2.19.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 13.3 \text{ kPa}$  y  $T = 110^\circ\text{C}$ .

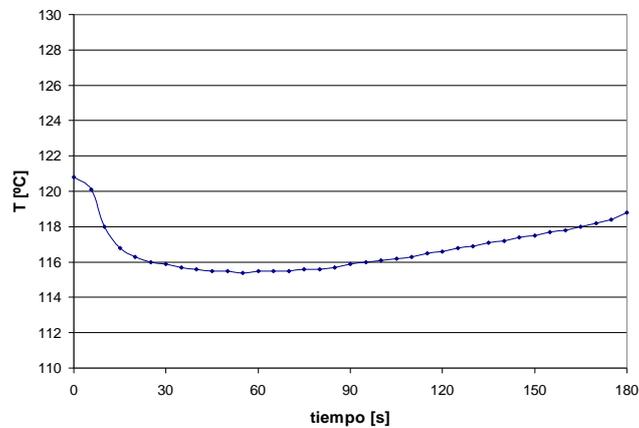


**Figura 2.20.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 110^\circ\text{C}$  y  $P = 18.6 \text{ kPa}$ .

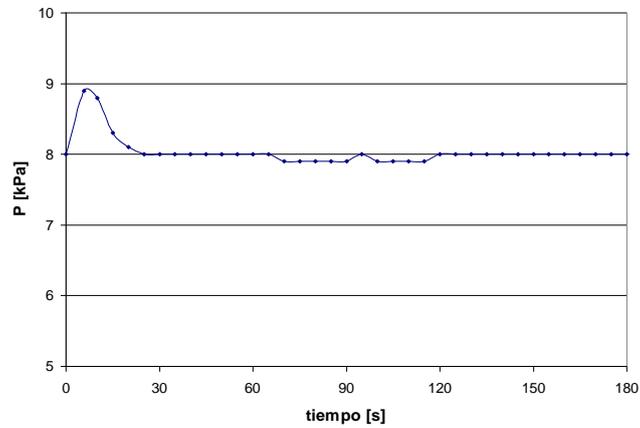
## Fritura al vacío



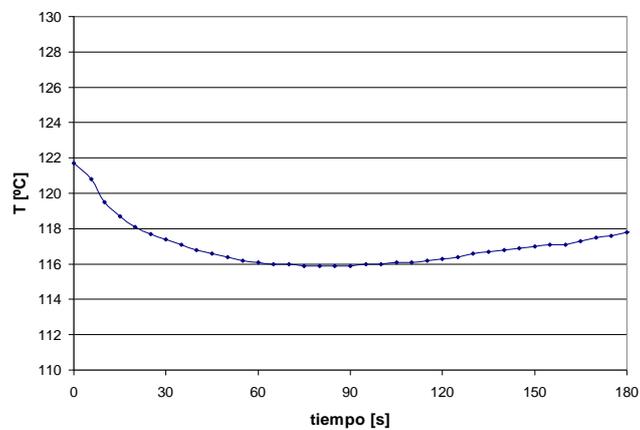
**Figura 2.21.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 18.6$  kPa y  $110^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 2.22.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 120$   $^{\circ}\text{C}$  y  $P = 8$  kPa.

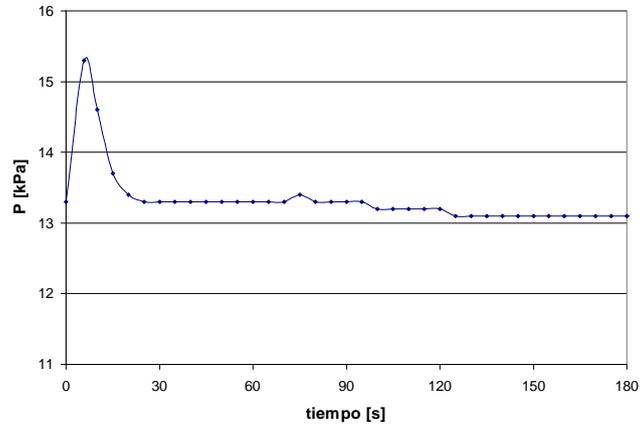


**Figura 2.23.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 8 \text{ kPa}$  y  $T = 120^\circ\text{C}$ .

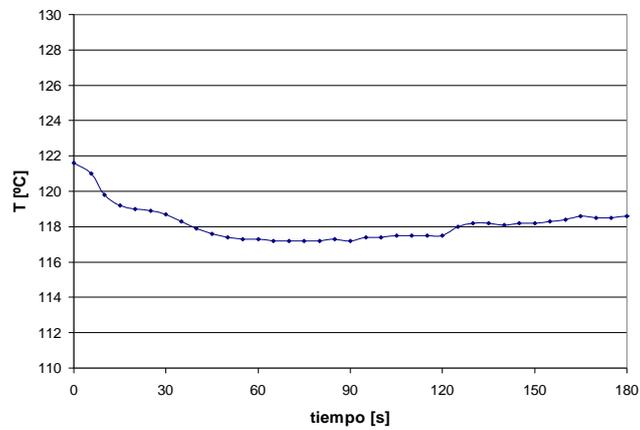


**Figura 2.24.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 120^\circ\text{C}$  y  $P = 13.3 \text{ kPa}$ .

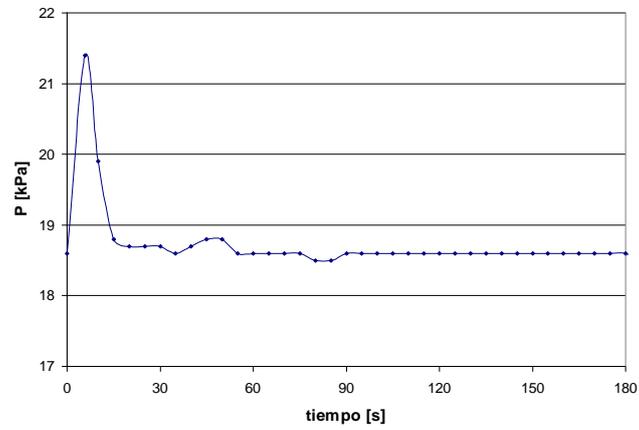
## Fritura al vacío



**Figura 2.25.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 13.3$  kPa y  $120^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 2.26.** Evolución de la temperatura durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $T = 120$   $^{\circ}\text{C}$  y  $P = 18.6$  kPa.



**Figura 2.27.** Evolución de la presión durante el tiempo de fritura de 4 láminas de manzana. Consigna:  $P = 18.6$  kPa y  $T = 120^{\circ}\text{C}$ .

Fritura al vacío

### **ANEXO 3. PROCEDIMIENTO PARA LA FRITURA AL VACÍO**

Colocar 5 litros de aceite en el recipiente de fritura

Colocar las trampas de vapor de agua en el recipiente que contiene el líquido refrigerante

Conectar la placa calefactora asignando la temperatura de trabajo en el controlador respectivo Se aumenta 2 °C a la temperatura de consigna, esperar 1 hora hasta que se estabilice la temperatura del aceite

Asignar la presión de trabajo en el controlador de presión, en mm de Hg negativos y con 2 mm de Hg de histéresis

Lavar y cortar cuatro manzanas en láminas de 2 mm de espesor

Pesar 4 láminas (1 rodaja de cada manzana) por punto hasta completar los puntos de la experiencia

1. Poner las 4 láminas de manzana en la canastilla
2. Cerrar la cámara y conectar la bomba de vacío
3. Ajustar la temperatura a la temperatura de consigna
4. Asignar el tiempo correspondiente al punto de la experiencia en el cronómetro

5. Al llegar a la presión de trabajo esperar 1 min para que se estabilice el sistema
6. Bajar la canastilla y accionar el cronómetro
7. Al transcurrir el tiempo de fritura levantar la canastilla
8. Iniciar la recuperación de la presión (romper el vacío)
9. Extraer las muestras y limpiar el aceite superficial con papel absorbente
10. Limpiar el agua condensada en la parte interna de la tapa
11. Pesarlas
12. Almacenar las láminas fritas en un recipiente de vidrio con tapa, con su identificación correspondiente al punto de la experiencia.

Fritura al vacío

## ANEXO 4. VALORES EXPERIMENTALES

### 4.1 Humedad adimensional ( $\Psi$ ) experimental obtenida por fritura a presión atmosférica

Tabla 4.1.1  $\Psi$  experimental por fritura a presión atmosférica

tiempo [s]	T [C]			
	140	150	160	170
0	1.000	1.000	1.000	1.000
30	0.496	0.314	0.268	0.219
60	0.251	0.135	0.090	0.060
90	0.117	0.032	0.020	0.007
120	0.073	0.015	0.004	0.000
150	0.014	0.010	0.004	0.008

#### 4.2 Humedad adimensional ( $\Psi$ ) experimental obtenida por presión reducida

**Tabla 4.2.1**  $\Psi$  experimental por fritura a 16.6 kPa.

$\Psi$ experimental					
tiempo [s]	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
30	0.723	0.537	0.498	0.351	0.297
60	0.536	0.338	0.252	0.104	0.137
90	0.379	0.213	0.139	0.044	0.027
120	0.300	0.108	0.071	0.021	0.018
150	0.210	0.052	0.016	0.008	0.004
180	0.132	0.050	0.011	0.007	0.007
300	0.038	0.010	0.002	0.005	0.007

**Tabla 4.2.2**  $\Psi$  experimental por fritura a 13.3 kPa.

$\Psi$ experimental					
tiempo [s]	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
30	0.617	0.531	0.502	0.307	0.261
60	0.409	0.353	0.242	0.125	0.082
90	0.317	0.181	0.155	0.037	0.011
120	0.173	0.099	0.057	0.014	0.005
150	0.129	0.050	0.019	0.003	0.003
180	0.043	0.027	0.006	0.002	0.002
300	0.027	0.007	0.001	0.002	0.003

Fritura al vacío

**Tabla 4.2.3**  $\Psi$  experimental por fritura a 8 kPa.

tiempo [s]	$\Psi$ experimental				
	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
30	0.494	0.422	0.327	0.337	0.213
60	0.280	0.196	0.175	0.098	0.024
90	0.230	0.121	0.101	0.027	0.010
120	0.135	0.023	0.019	0.005	0.006
150	0.057	0.018	0.008	0.005	0.005
180	0.051	0.003	0.011	0.003	0.006
300	0.005	0.001	0.003	0.004	0.005

#### **4.3 Datos experimentales y calculados del contenido de aceite de láminas de manzana fritas a las diferentes condiciones de proceso**

En las tablas 4.3.1, 4.3.4 y 4.3.6, se muestran el contenido de aceite determinado experimentalmente por medio del método descrito en el apartado 4.4, dividido para la materia seca.

El contenido de aceite calculado es el resultado de la diferencia del peso total de la muestra, después de la fritura, menos el contenido de agua y menos la materia seca, dividido para la materia seca. En las tablas 4.3.2, 4.3.3, 4.3.5 y 4.3.7 se muestran los datos de contenido de aceite obtenidos por medio del cálculo matemático.

**Tabla 4.3.1.** Contenido de aceite determinado experimentalmente. P= 101.3 kPa

tiempo [s]	g aceite / g bs	
	140°C	160°C
0	0.000	0.000
30	1.120	0.981
60	1.039	1.336
90	1.309	2.208
120	1.133	2.662
150	1.796	2.619

**Tabla 4.3.2.** Contenido de aceite calculado. P= 101.3 kPa

tiempo [s]	g aceite / g bs			
	140°C	150°C	160°C	170°C
0	0.000	0.000	0.000	0.000
30	0.757	0.884	0.878	0.997
60	0.970	1.244	1.371	1.523
90	1.298	1.509	1.781	1.819
120	1.414	1.593	1.942	1.992
150	1.560	1.651	1.921	2.194

Fritura al vacío

**Tabla 4.3.3.** Contenido de aceite calculado. P = 16.6 kPa

tiempo [s]	g aceite / g bs				
	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	0.86339	0.83466	0.62281	0.56193	0.40984
60	0.75069	0.75777	0.56953	0.77654	0.67540
90	0.73242	0.72502	0.64666	0.69733	1.17505
120	0.95754	0.77177	0.66916	0.70037	1.26515
150	0.73000	0.84140	0.75593	0.79581	1.15654
180	0.74381	0.84581	0.76082	0.78798	1.18815
300	1.13470	0.92751	0.74915	0.70444	1.39573

**Tabla 4.3.4.** Contenido de aceite determinado experimentalmente. P = 13.3 kPa

tiempo [s]	g aceite / g bs		
	90°C	100°C	110°C
0	0.000	0.000	0.000
30	0.808	0.890	0.840
60	0.703	0.760	0.747
90	0.836	0.721	0.906
120	0.992	0.985	0.764
150	1.054	1.121	1.003
180	1.160	1.097	0.883
300		1.101	0.986

**Tabla 4.3.5.** Contenido de aceite calculado. P = 13.3 kPa.

<b>g aceite / g bs</b>					
<b>tiempo [s]</b>	<b>80°C</b>	<b>90°C</b>	<b>100°C</b>	<b>110°C</b>	<b>120°C</b>
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	1.058	0.718	0.789	0.709	0.546
60	0.858	0.720	0.618	0.735	0.621
90	0.725	0.765	0.701	0.858	0.765
120	0.898	0.894	0.798	0.889	0.865
150	1.059	0.969	0.896	0.957	0.791
180	1.328	0.929	1.007	0.892	0.795
300	1.500	1.071	0.940	0.943	0.762

**Tabla 4.3.6.** Contenido de aceite determinado experimentalmente. P = 8kPa

<b>g aceite / g bs</b>	
<b>tiempo [s]</b>	<b>110°C</b>
0	0.000
30	0.868
60	1.034
90	0.985
120	0.997
150	1.063
180	1.012
300	1.029

Fritura al vacío

**Tabla 4.3.7.** Contenido de aceite calculado. P = 8kPa.

tiempo [s]	g aceite / g bs				
	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	0.923	0.651	0.673	0.703	0.617
60	0.886	0.694	0.674	0.728	0.978
90	0.801	0.761	0.922	0.807	0.981
120	0.999	1.079	0.987	0.903	1.001
150	1.214	1.128	1.048	0.991	0.981
180	1.329	1.093	0.951	0.944	1.079
300	1.690	1.130	0.973	0.908	1.025

**ANEXO 5. VALORES CALCULADOS DE LAS CONSTANTES DE AJUSTE, PARA LA ECUACIÓN DE MONOD (ECUACIÓN 4.6.2.1)**

**Tabla 5.1.** Valores de las constantes A, B y porcentaje de varianza (%var) a las diferentes temperaturas del aceite. P=101.3kPa

<b>T [°C]</b>	<b>A [g aceite/g bs]</b>	<b>B [s]</b>	<b>% var</b>
140	2.2	65.8	99.2
150	2.1	42.3	99.8
160	2.9	63.1	99.1
170	3.1	62.1	99.9

**Tabla 5.2.** Valores de las constantes A, B y porcentaje de varianza (%var) a las diferentes temperaturas del aceite. P=16.6kPa

<b>T [°C]</b>	<b>A [g aceite/g bs]</b>	<b>B [s]</b>	<b>% var</b>
80	0.9	4.0	82.1
90	0.8	2.1	95.7
100	0.8	10.4	96.4
110	0.8	9.2	96.0
120	1.8	74.0	94.2

Fritura al vacío

**Tabla 5.3.** Valores de las constantes A, B y porcentaje de varianza (%var) a las diferentes temperaturas del aceite. P=13.3kPa

T [°C]	A [g aceite/g bs]	B [s]	% var
80	1.3	21.6	74.6
90	1.1	21.2	96.0
100	0.9	13.4	88.9
110	1.0	13.7	98.7
120	0.9	17.6	96.6

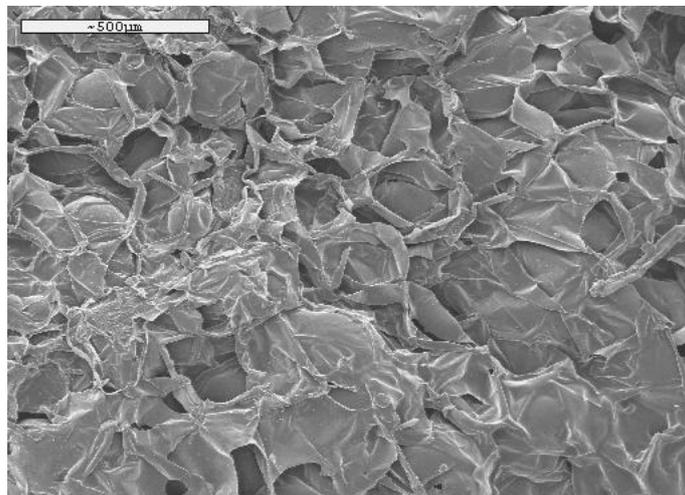
**Tabla 5.4.** Valores de las constantes A, B y porcentaje de varianza (%var) a las diferentes temperaturas del aceite. P= 8 kPa.

T [°C]	A [g aceite/g bs]	B [s]	% var
80	1.8	63.2	84.6
90	1.3	41.9	94.6
100	1.1	22.2	95.8
110	1.0	15.2	97.4
120	1.2	19.3	97.2

## ANEXO 6. MICROFOTOGRAFÍAS DE LÁMINAS

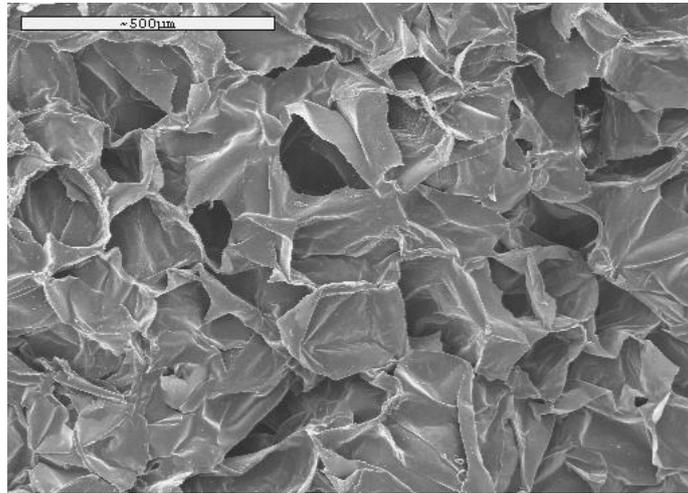
### DE MANZANA FRITA

#### 6.1 Fritura a presión atmosférica y 160°C. Muestras desengrasadas.

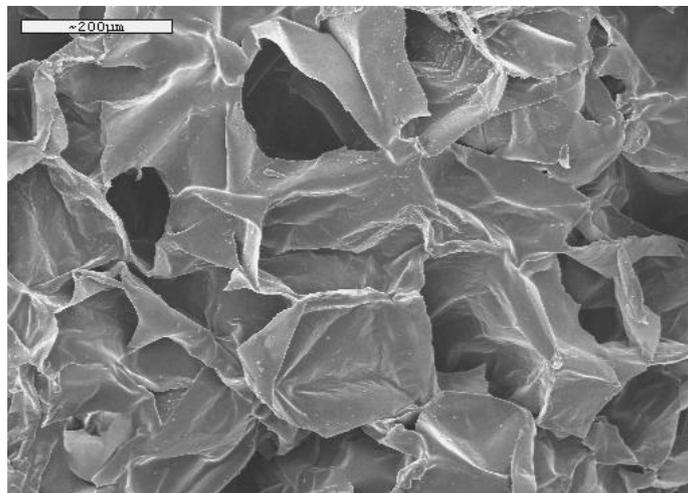


**Figura 6.1.1.** Vista superficial, 75X

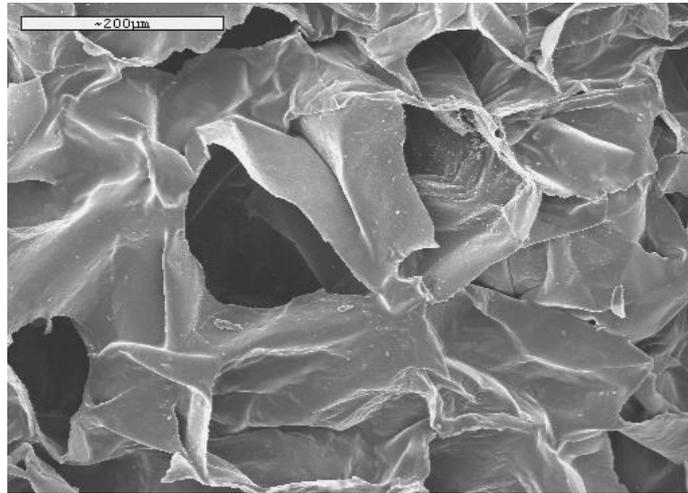
Fritura al vacío



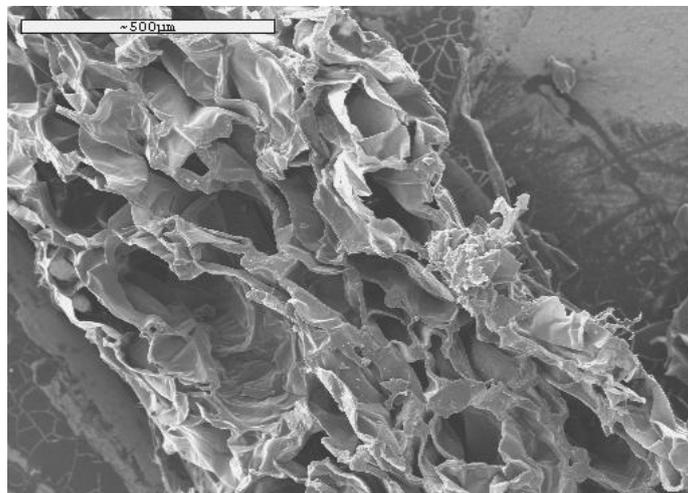
**Figura 6.1.2.** Vista superficial, 100X



**Figura 6.1.3.** Vista superficial, 150X

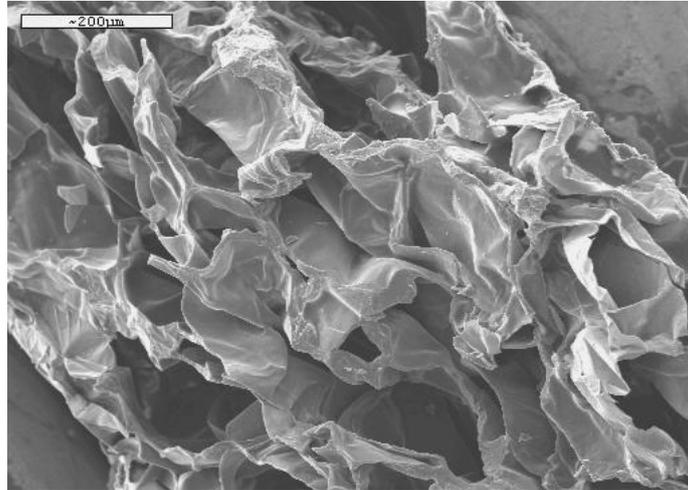


**Figura 6.1.4.** Vista superficial, 200X



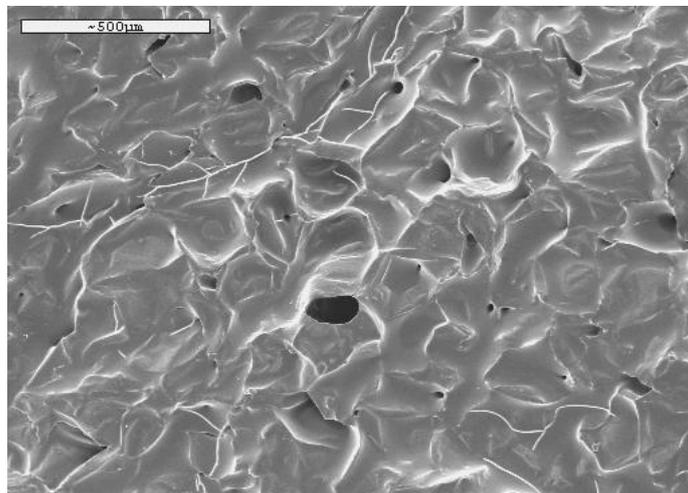
**Figura 6.1.5.** Vista transversal, 100X

Fritura al vacío

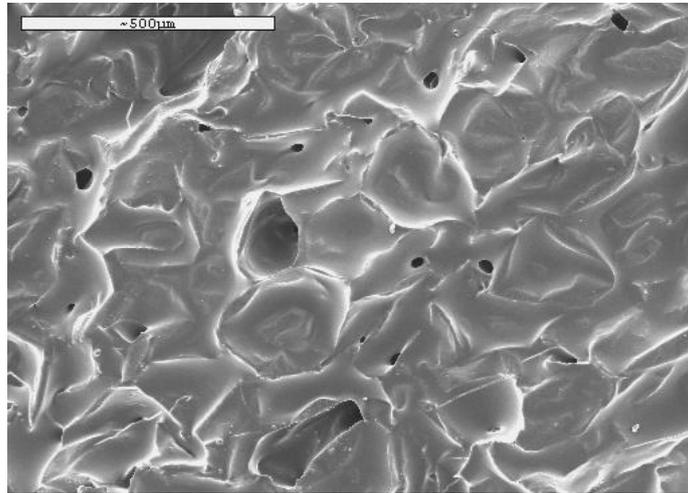


**Figura 6.1.6.** Vista transversal, 150X

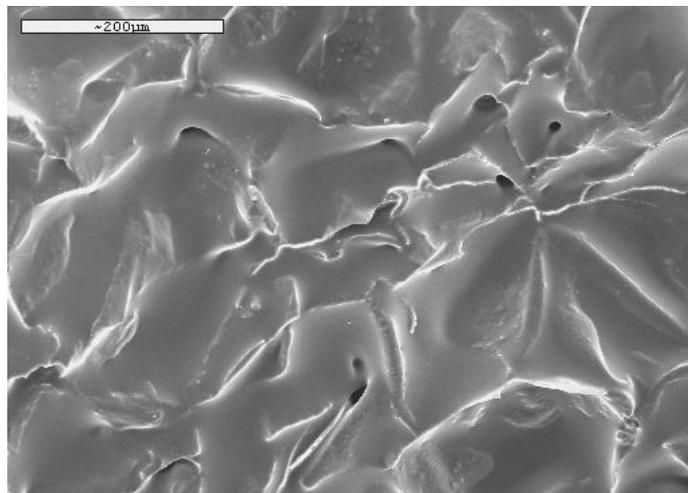
**6.2. Fritura a presión atmosférica y 160°C. Muestras sin desengrasar.**



**Figura 6.2.1.** Vista superficial, 75X

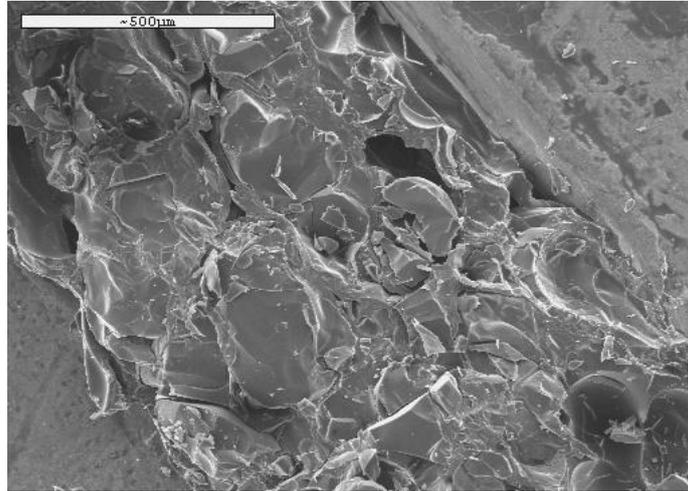


**Figura 6.2.2** Vista superficial, 100X

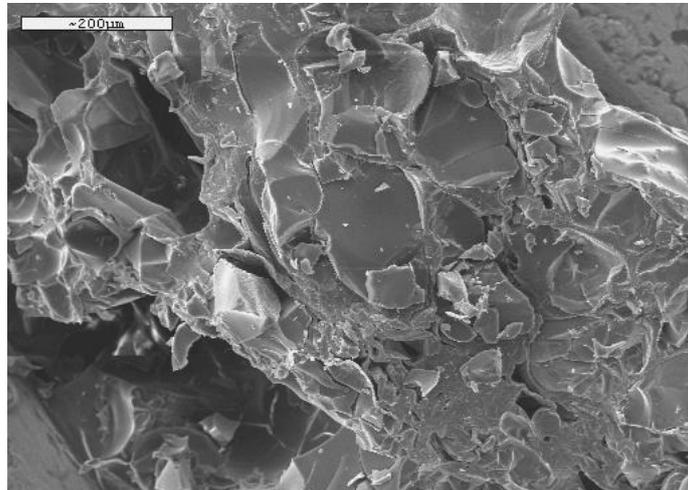


**Figura 6.2.3.** Vista superficial, 200X

Fritura al vacío

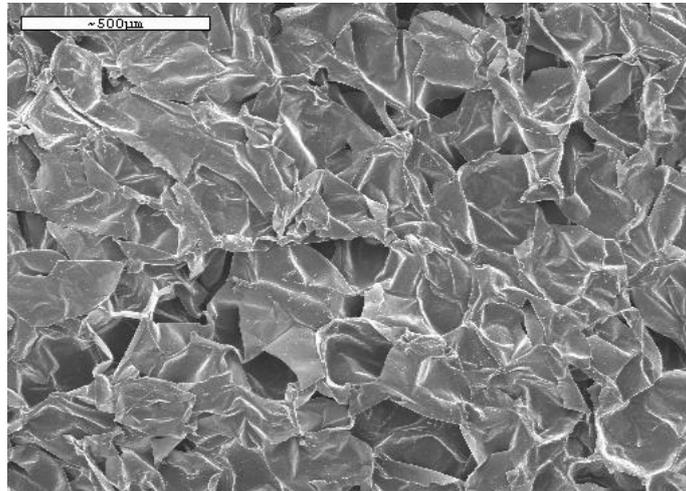


**Figura 6.2.4.** Vista transversal, 100X

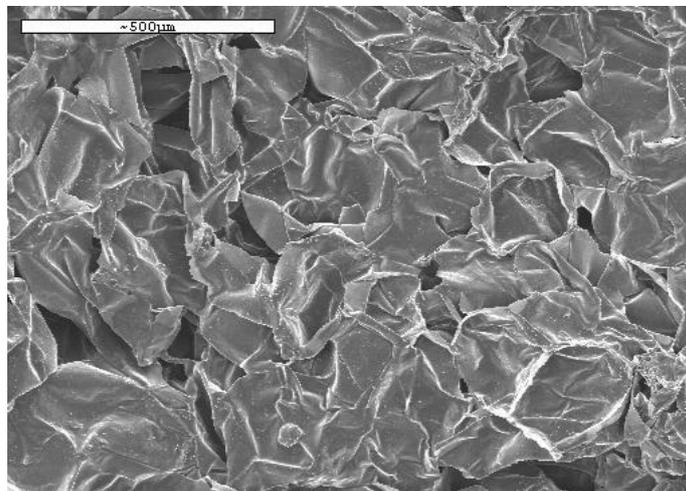


**Figura 6.2.5.** Vista transversal, 150X

**6.3. Fritura a la presión de 8 kPa y 100°C. Muestras desengrasadas.**

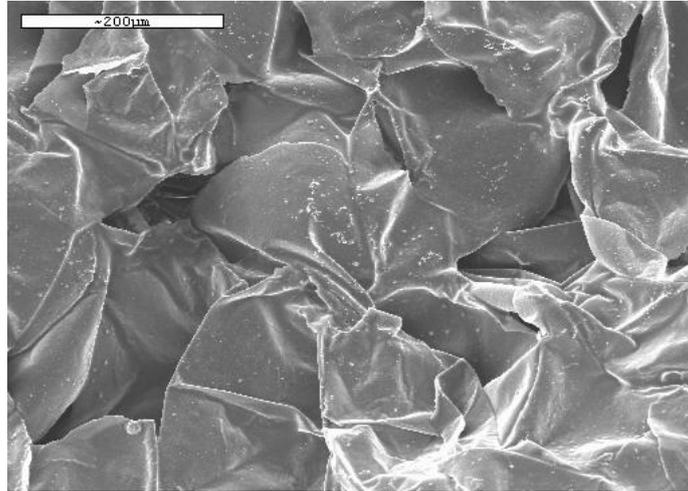


**Figura 6.3.1.** Vista superficial, 75X

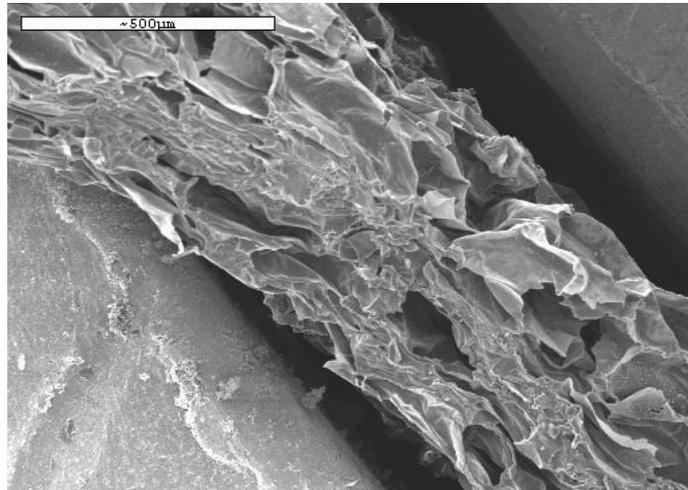


**Figura 6.3.2.** Vista superficial, 100X

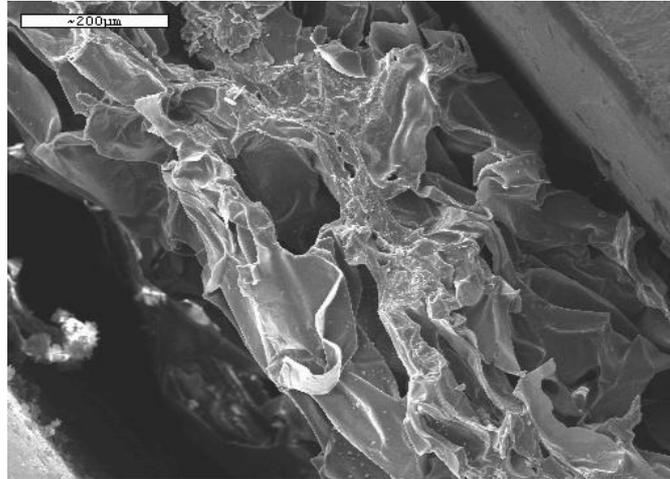
Fritura al vacío



**Figura 6.3.3.** Vista superficial, 200X

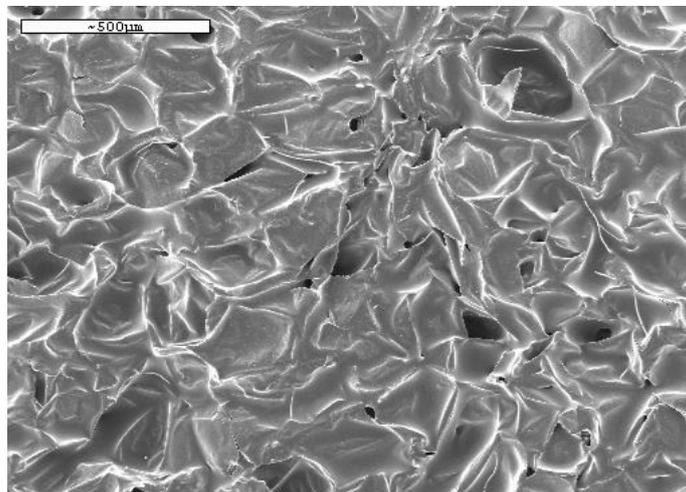


**Figura 6.3.4.** Vista transversal, 100X



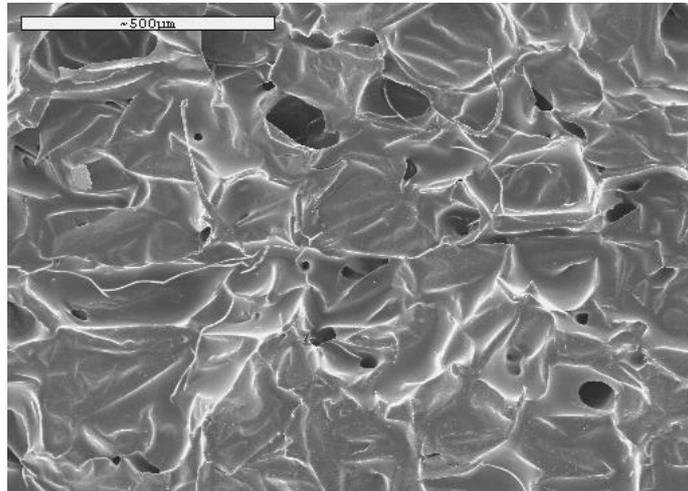
**Figura 6.3.5.** Vista transversal, 150X

**6.4. Fritura a la presión de 8 kPa y a 100°C. Muestras sin desengrasar.**

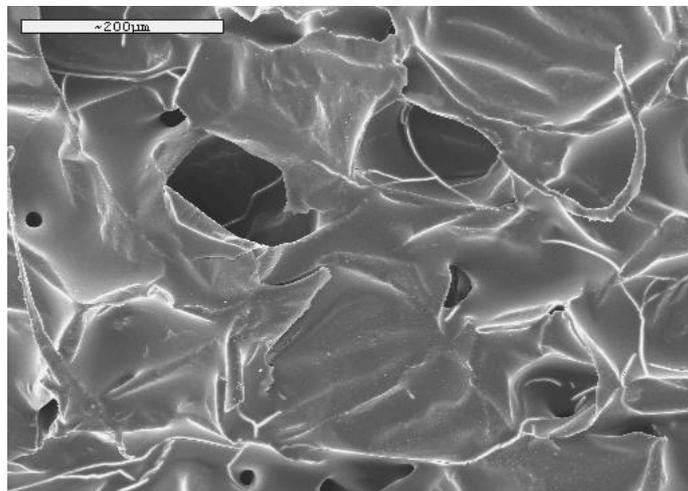


**Figura 6.4.1.** Vista superficial, 75X

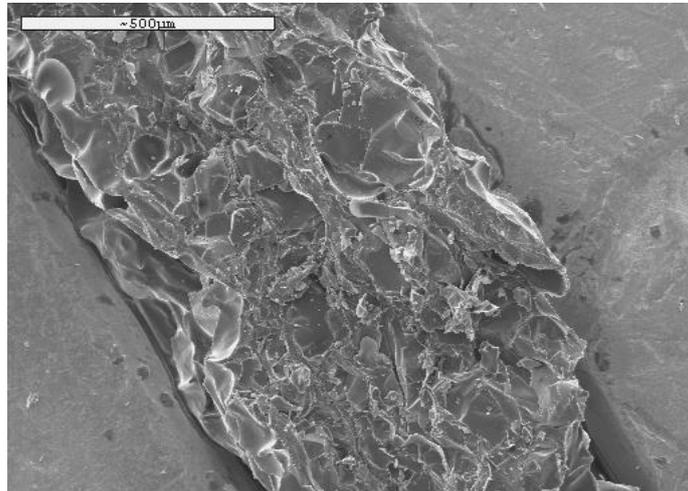
Fritura al vacío



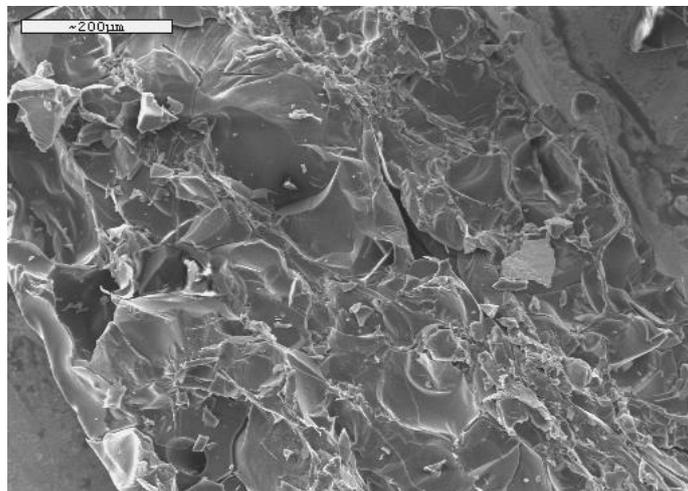
**Figura 6.4.2.** Vista superficial, 100X



**Figura 6.4.3.** Vista superficial, 200X



**Figura 6.4.4.** Vista transversal, 100X



**Figura 6.4.4.** Vista transversal, 150X

Fritura al vacío

## ANEXO 7. FOTOGRAFÍAS DE LÁMINAS DE MANZANA FRITA



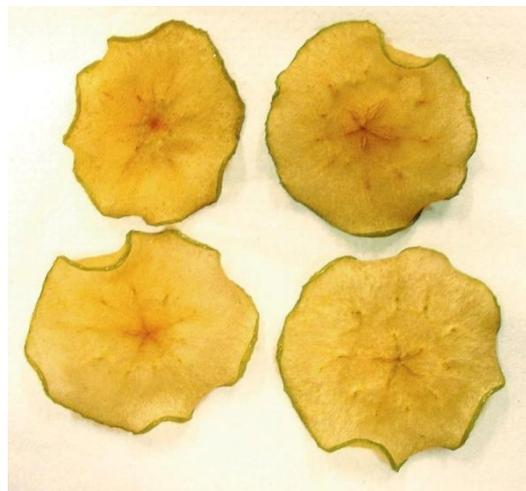
**Figura 6.7.1.** Láminas de manzana procesadas a:  $P= 16.6$  kPa,  $T = 120$  C. 300 s.



**Figura 6.7.2.** Láminas de manzana procesadas a:  $P= 13.3$  kPa,  $T = 120$  C. 300 s.

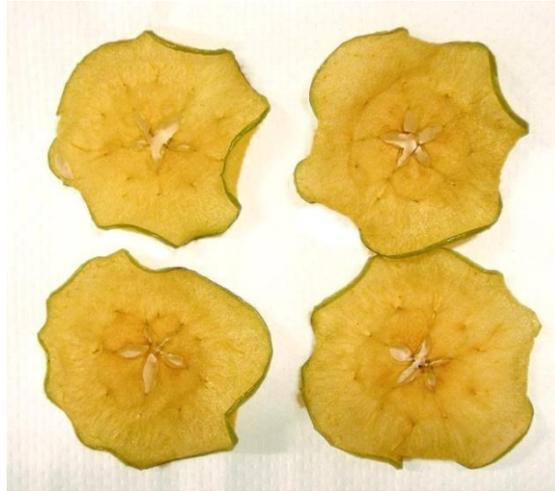


**Figura 6.7.3.** Láminas de manzana procesadas a:  $P= 8 \text{ kPa}$ ,  $T = 120 \text{ C}$ . 300 s.

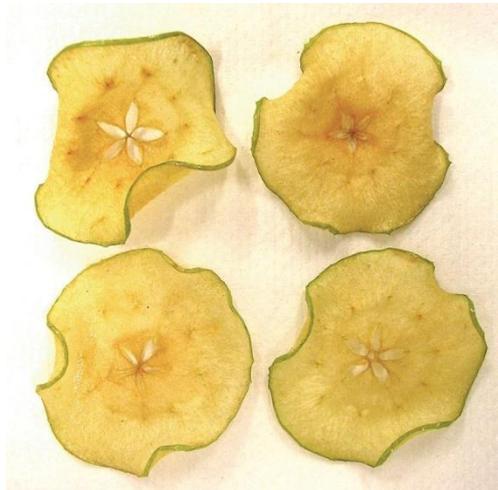


**Figura 6.7.4.** Láminas de manzana procesadas a:  $P= 16.6 \text{ kPa}$ ,  $T = 110 \text{ C}$ . 300 s.

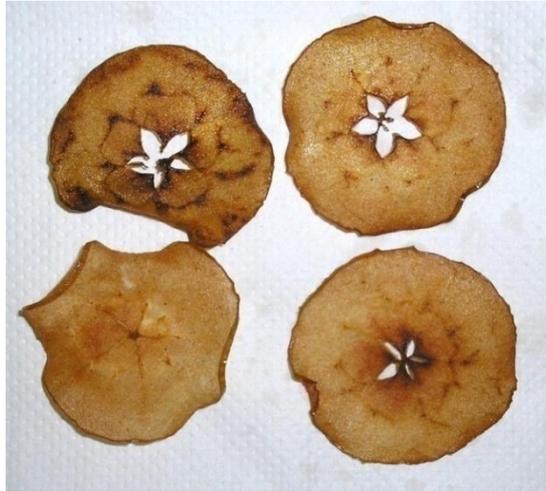
Fritura al vacío



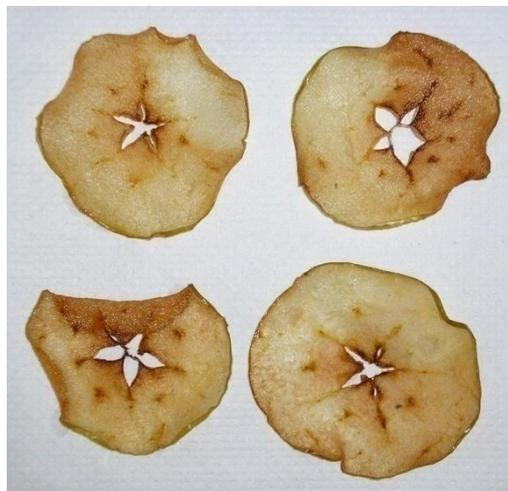
**Figura 6.7.5.** Láminas de manzana procesadas a:  $P= 13.3$  kPa,  $T = 110$  C. 300 s.



**Figura 6.7.6.** Láminas de manzana procesadas a:  $P= 8$  kPa,  $T = 110$  C. 300 s.



**Figura 6.7.7.** Láminas de manzana procesadas a:  $P= 101.3 \text{ kPa}$ ,  $T = 160 \text{ C.}$ 120 s.



**Figura 6.7.8.** Láminas de manzana procesadas a:  $P= 101.3 \text{ kPa}$ ,  $T = 150 \text{ C.}$  120s.

Fritura al vacío

## **ANEXO 8. PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS DOCTORAL**

- ❖ **Bravo, J.**, Ruales, J., Sanjuán, N. y Clemente, G. (2006). INNOVACIONES EN EL PROCESO DE FRITURA: LA FRITURA AL VACÍO, Alimentación, Equipos y Tecnología, 209, 87-94.
- ❖ **J. Bravo**, N. Sanjuán, R. Peña, J. Ruales, A. Mulet. (2007). DISEÑO DE UN EQUIPO DE LABORATORIO PARA FRITURA AL VACÍO. Alimentos Ciencia e Ingeniería, 16(1), 315-317.
- ❖ **J. Bravo**, J. Ruales, G. Clemente y N. Sanjuán. (2007). LA FRITURA AL VACÍO. Alimentos Ciencia e Ingeniería, 16(2), 33-34.

### Enviado a publicación

- ❖ **J. Bravo**, N. Sanjuán, J. Ruales, A. Mulet. (2008). MODELLING THE DEHYDRATION OF APPLE SLICES BY DEEP FAT FRYING.
- ❖ **J. Bravo**, N. Sanjuán, J. Ruales, A. Mulet. (2008). PRESSURE INFLUENCE ON DEEP FAT FRYING OF APPLE CHIPS.

### Publicado en congresos

AUTORES: **J. Bravo**, J. Ruales, G. Clemente y N. Sanjuán

TÍTULO: Deshidratación de manzana por fritura al vacío

TIPO DE PARTICIPACIÓN: Póster

CONGRESO: IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos

LUGAR DE CELEBRACIÓN: Valparaiso, Chile

FECHA: 5-8, octubre, 2003

AUTORES: **J., Bravo**, J., Ruales, J., Sanjuán, N. y Mulet, A.

TÍTULO: Cinética de la pérdida de humedad en la fritura al vacío.

TIPO DE PARTICIPACIÓN: Póster

CONGRESO: V Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos

LUGAR DE CELEBRACIÓN: Puerto Vallarta, Méjico

FECHA: 4 – 7, septiembre, 2005

AUTORES: **Bravo, J.**, Villacís, R., Ruales, J. y Mulet, A.

TÍTULO: Influencia de las variables de operación en la calidad de *chips* de manzana obtenidos por fritura al vacío

TIPO DE PARTICIPACIÓN: Ponencia

CONGRESO: I Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología.

PUBLICACIÓN: Proceedings de I Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología.

LUGAR DE CELEBRACIÓN: Quito, Ecuador

FECHA: 3, noviembre, 2005

AUTORES: Sanjuán N., **Bravo, J.**, Benedito, J.J., Peña, R., Mulet, A.

TÍTULO: Frying of apple chips. Comparison between vacuum and conventional methods

TIPO DE PARTICIPACIÓN: Póster

CONGRESO: 15th Internacional Drying Symposium (IDS 2006)

PUBLICACIÓN: Proceedings of the 15th International Drying Symposium

LUGAR DE CELEBRACIÓN: Budapest, Hungría

FECHA: 20-23, agosto, 2006