

NUEVO SISTEMA DE SECADO POR ATOMIZACIÓN ASISTIDO POR MICROONDAS

ALUMNO: Tomás Alcarria Villora

DIRECTORES ACADÉMICOS:

José Manuel Barat Baviera¹

José Manuel Catalá Civera²

DIRECTOR EXPERIMENTAL:

Pedro J. Plaza González³

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de un equipo de evaporación por atomización mediante el aporte en continuo de energía por microondas. El calentamiento conseguiría elevar la presión y temperatura de la muestra fluida que está circulando continuamente por un conducto a través de una cavidad de microondas especialmente diseñada. A la salida del conducto la muestra se evaporaría/dispersaría al pasar a presión ambiente, de forma instantánea con el consiguiente secado, que podría suponer la reducción del daño de los compuestos bioactivos. En el desarrollo, se ha conseguido vaporizar de manera estable y con gran generación de vapor, cuando se ha utilizado una boquilla metálica de 0.5 mm a la salida del conducto capilar. Los resultados de vaporización de agua desionizada han sido muy buenos en las condiciones de proceso: Potencia de 300 W, caudales de fluido de 1.5 y 1.8 mL/min, diámetro interior de capilar de 0.5 mm, con una de espiral de capilar con 3 vueltas (30 mm diámetro) e iris utilizado de 27 mm. Con zumo diluido los resultados no han sido tan buenos, pero si interesantes. Ha habido problemas de fusión de los capilares y se cree que adaptar un sistema de refrigeración o utilizar capilar de otro material (vidrio u cerámica) más resistente al calor podrían ser opciones de mejora para posteriores desarrollos. El montaje del aplicador y el uso de aire caliente en la unidad de secado, pueden ser también opción de mejora. Se ha hecho un cálculo del rendimiento del proceso de secado con agua vaporizada obteniendo un 53% (agua eliminada). Con zumo diluido de manzana son del 20-30%.

RESUM

L'objectiu d'aquest treball consisteix en el desenvolupament d'un equip d'evaporació per atomització mitjançant l'aportació en continu d'energia per microones. L'escalfament aconseguiria elevar la pressió i temperatura de la mostra fluida que està circulant contínuament per un conducte a través d'una

¹ Universidad Politécnica Valencia. Departamento de tecnología de alimentos (DTA)

² Instituto Universitario de Aplicaciones de las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones Avanzadas (ITACA)

³ Instituto Universitario de Aplicaciones de las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones Avanzadas (ITACA)

cavitat de microones especialment dissenyada. A l'eixida del conducte la mostra s'evaporaria/dispersaria en passar a pressió ambiente, de forma instantània amb el consegüent assecat, que podria suposar la reducció del dany dels compostos bioactius. En el desenvolupament, s'ha aconseguit vaporitzar de manera estable i amb gran generació de vapor, quan s'ha utilitzat un filtre metàl·lic de 0.5 mm a l'eixida del conducte capil·lar. Els resultats de vaporització d'aigua desionitzada han sigut molt bons en les condicions de procés: Potència de 300 W, cabals de fluid d'1.5 i 1.8 ml/min, diàmetre interior de capil·lar de 0.5 mm, amb una d'espiral de capil·lar amb 3 voltes (30 mm diàmetre) i iris utilitzat de 27 mm. Amb suc diluït els resultats no han sigut tan bons, però sí interessants. Hi ha hagut problemes de fusió dels capil·lars i es creu que adaptar un sistema de refrigeració o utilitzar capil·lar d'un altre material (vidre o ceràmica) més resistent a la calor podien ser opcions de millora per a posteriors desenvolupaments. El muntatge de l'aplicador i l'ús d'aire calent en la unitat d'assecat, poden ser també opció de millora. S'ha fet un càlcul del rendiment del procés d'assecat amb aigua vaporitzada obtenint un 53% (aigua eliminada). Amb suc diluït de poma són del 20-30%.

ABSTRACT

The aim of this work consists in the development of evaporation equipment by atomisation by means of the contribution in continuous of energy by microwaves. The warming would achieve to elevate the pressure and temperature of the fluent sample that is circulating continuously by a pipe through a cavity of microwaves especially designed. To the exit of the pipe the sample would evaporate /would disperse when happening to pressure acclimatize, of instantaneous form with the consequent dried that could suppose the reduction of the damage of the bioactive compounds. In the development, has achieved vaporization of stable way and with big generation of steam, when it has used a metallic filter of 0.5 mm to the exit of the capillary. The results of deionized water vaporization have been very good in the conditions of process: Power of 300 W, discharges of fluid of 1.5 and 1.8 mL/min, capillary inner diameter of 0.5 mm, with a spiral capillary circuit with 3 turns (30 mm diameter) and iris used of 27 mm. With diluted juice the results have not been so good, but if interesting. There have been problems of capillary fusion and thinks that adapt a system of refrigeration or use capillaries of another material (glass or ceramic) more resistant to the heat could be options of improvement for back developments. The setting of the device and the use of hot air in the drying unit can be also option of improvement. It has done a calculation of the performance of the vaporized water drying process obtaining 53% (water eliminated). With apple juice diluted of are of the 20-30%.

Palabras clave: microondas, vaporización, atomización.

1. INTRODUCCIÓN

La deshidratación es una de las técnicas más antiguas utilizada para la conservación de alimentos, como por ejemplo el secado al sol. Las técnicas no sufrieron cambios importantes hasta la Revolución Industrial. Actualmente la desecación puede llevarse a cabo por diferentes métodos, mecánicos y físico-químicos como pueden ser: centrifugación, evaporación superficial, ósmosis, liofilización, congelación, etc. Hoy en día, la técnica más utilizada es el secado por aire caliente (Fito et al., 2001).

En el mercado puede encontrarse una amplia variedad de productos deshidratados o formulados a partir de ingredientes deshidratados. La operación de deshidratación puede conllevar cambios indeseables en los alimentos: En el sabor y aroma, pérdida de nutrientes, compuestos bioactivos, aunque las investigaciones llevadas a cabo en este campo han permitido minimizar estos aspectos negativos como es, conservar en lo posible los compuestos bioactivos (Kris-Etherton et al., 2002). En general, la mayoría de compuestos bioactivos se caracterizan por una marcada acción antioxidante. Resulta de gran interés el estudio del impacto de tratamientos alternativos a los procesos térmicos convencionales como el secado por aire caliente. Las elevadas temperaturas que se emplean son responsables de la reducción de los antioxidantes naturales de las frutas (Nicoli et al., 1999 y Miranda et al., 2009). En este contexto, la aplicación de microondas, ha recibido creciente interés en los últimos años, ya que pueden ayudar a minimizar pérdidas de calidad en términos de su valor nutritivo y funcional: mejor retención de fenoles totales, catequinas, vitamina C, carotenos totales y licopeno (Ramesh et al., 2002; Gulati et al., 2003; Mayeaux et al., 2006; Yuanyuan et al., 2007).

El calentamiento/secado por microondas (MW), tiene la ventaja de la polarización que tiene lugar a nivel atómico y molecular. A diferencia del calor por conducción, las MW calientan la totalidad del volumen de muestra simultáneamente (Cravotto et al., 2008). Numerosos estudios han demostrado que la utilización de energía de microondas en diversos procesos permite reducir el tiempo y el coste, simplificar los procesos y aumentar su eficiencia (Metaxas y Meredith, 1983). A medida que se va extendiendo el uso de la energía de microondas para acelerar procesos de extracción, se van conociendo y analizando sus beneficios. Se desarrollan nuevos equipos de microondas y la instrumentación es más sencilla y barata, por lo que los analistas amplían cada vez más el rango de aplicabilidad de esta tecnología (LeBlanc, 1999). La velocidad y eficiencia obtenidas sugieren que se puede aplicar las microondas a la extracción de compuestos bioactivos a partir de materias primas vegetales como frutas y vegetales (Carr y Frei, 1999; Bailey, 1999; Tulipani, 2008). En procesos de extracción de antioxidantes, la capacidad de realizar el calentamiento de forma instantánea y uniforme en todo el volumen de la muestra supondría una diferencia drástica en cuanto a la calidad de los antioxidantes obtenidos y por tanto en la eficiencia económica del proceso (Cravotto et al., 2008). La obtención de productos deshidratados con un elevado contenido en compuestos activos tiene usos potenciales como fortificantes e incluso para su empleo en farmacología y cosmética. De esta forma se revalorizarían dichas producciones dándoles un mayor valor añadido (Garau et al., 2007; Nindo et al., 2003; Chan et al., 2009).

No obstante, estos tratamientos se encuentran todavía en una fase muy preliminar y es muy escasa la información al respecto en comparación con lo que se conoce de los tratamientos térmicos convencionales.

El objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de un equipo de evaporación por atomización mediante el aporte en continuo de energía por microondas. El calentamiento conseguiría elevar la presión y temperatura de la muestra fluida que está circulando continuamente por un conducto a través de una cavidad de microondas especialmente diseñada. A la salida del conducto la muestra se evaporaría/dispersaría al pasar a presión ambiente, de forma instantánea con el consiguiente secado, que podría suponer la reducción del daño de los compuestos bioactivos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se engloba en el proyecto de investigación de “secado ultrarápido mediante la aplicación de microondas de potencia en un proceso continuo para la conservación de principios activos en alimentos” en el cual participan el Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo (IIAD) y el Instituto Universitario de Aplicaciones de las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones Avanzadas (ITACA). Se ha desarrollado con objetivo de encontrar las mejores condiciones de vaporización de un aplicador microondas ajustando sus componentes y variables, para luego incorporar este, en una unidad de secado y continuar el estudio de rendimiento de secado. Para ello, se han planificado una serie de ensayos para la mejora del aplicador y posteriormente de rendimiento de secado. Con este estudio se combinarían las ya conocidas ventajas de las microondas con el efecto único del calentamiento prácticamente instantáneo del producto y nos apoyaremos en técnicas como la nebulización térmica (TN). En TN la muestra fluida es forzada a pasar a través de un capilar, siendo empleadas las microondas como fuente de energía alternativa de calentamiento (Bordera et al., 1997; Grindlay et al., 2008).

2.1. Aplicador microondas

En este estudio, se utilizó un prototipo de aplicador microondas desarrollado por el Laboratorio de microondas (DIMAS). Para construir el aplicador se realizó un estudio electromagnético, analizando su funcionamiento. Después de esto y previo diseño, se procedió a la construcción y montaje del prototipo, que integró las diferentes partes construidas. Se desarrolló o adquirió los sistemas adicionales, tales como, sistemas de refrigeración, sistemas de control del fluido, etc.

Con el prototipo ya operativo, se procedió a realizar los ensayos, donde se realizaron cambios en componentes del equipo para mejorar el rendimiento.

- **Componentes del prototipo:**

El aplicador de energía de microondas era el componente fundamental, ya que de su funcionamiento depende en mayor grado las prestaciones del sistema en su conjunto. Se componía de:

Generador de microondas: Formado por diferentes elementos ensamblados, y eran el magnetrón (National, NL-10246), que es la válvula donde se genera la

energía de microondas y la fuente de alimentación de alta tensión (Dipolar, Magdrive1000). También formaba parte el launcher y aislador, integrado en un único bloque compacto (Valvo VZU1234).

Cavidad del aplicador microondas: Formada por el iris que es una lámina metálica sobre la que se practica una apertura circular del tamaño adecuado; El fragmento de guía de onda rectangular, con la estructura de soporte para la ubicación de la muestra y el cortocircuito de longitud ajustable para la sintonización de la frecuencia de trabajo.

Componentes accesorios del prototipo:

Capilar de alta presión y disposición en la cavidad: El conducto capilar (VICI) a través del cual circula el fluido tiene que tener como características, las de soportar una alta presión y temperatura, debido al rápido incremento de temperatura del fluido en su interior y presentar una muy baja absorción de microondas. El material seleccionado fue polímero PEEK, que soporta unos 250 °C y hasta 300 bares de presión. Su diámetro externo es de 1/16 de pulgada y se han elegido varios diámetros internos (0,25, 0,5, 0,75 y 1 mm).

A fin de conseguir aplicar la mayor parte de energía de microondas, era necesario disponer de una cierta cantidad de fluido en el interior del aplicador de microondas. Para conseguir esto, se optó por la construcción de una estructura con forma de espiral con una serie de vueltas. Se dispuso el tubo capilar dentro de la cavidad con un ángulo de aproximadamente 45° a la dirección de llegada de las microondas (Figura 2.1 izquierda).

Bomba peristáltica, válvula, boquilla, manómetro y refrigerador de agua: La bomba peristáltica (Lambda PreciseFlow) impulsaba el fluido. La válvula de presión (BPR-1) era de regulación manual y tenía una entrada o un acople que permitía capilares de 1/16". La boquilla era parte de una aguja metálica de jeringa de 0,5 mm de diámetro. Se colocaría en sustitución de la válvula. El manómetro mecánico (WIKA) permitía la conexión de entrada del circuito de la bomba y también la entrada del capilar de 1/16", mediante un acople metálico (DIMAS) y unas gomas conectoras. El sistema de generación de energía de microondas precisaba de un equipo de refrigeración por agua (Hyfra LWK21).

2.2. Equipo de secado

Después de las pruebas de vaporización se montó el prototipo en un sistema de secado. La integración en el montaje se ha realizado mediante una pequeña plataforma (DIMAS). Esto permitía que la salida del vaporizado entrara directamente en la cámara de secado, y mediante una corriente de aire a temperatura ambiente que se aporta desde una entrada adyacente, era forzado a ir hacia el ciclón separador por donde salía el vapor por la parte de arriba.

Cámara de secado y ciclón separador: Estos componentes estaban fabricados en vidrio Pyrex (BÜCHI Labortechnik AG, mod.290, Suiza).

Montaje del equipo en rack: El equipo, para el proceso de secado se montó sobre un rack para facilitar su utilización así como su posible cambio de ubicación durante los ensayos.

En la figura 2.1 derecha se muestra el diagrama de bloques del sistema completo.

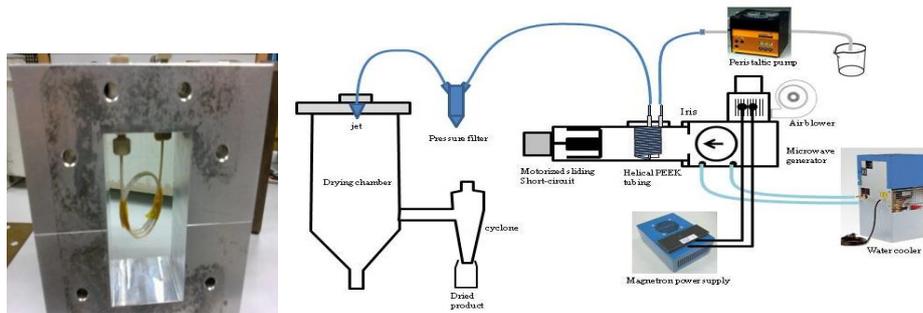


FIGURA 2.1. Izquierda: Disposición del tubo capilar dentro de la cavidad. Derecha: Esquema equipo completo.

2.3. Diseño del experimento

Brevemente, esto sería básicamente el diseño del experimento:

- Construcción y montaje del aplicador microondas en laboratorio.
- Realización de ensayos con el fin de conseguir las mejores condiciones de vaporización de agua desionizada con el aplicador microondas.
- Realización de ensayos: se buscaron las mejores condiciones de vaporización de zumo diluido de manzana a partir de los resultados obtenidos con agua desionizada.
- Ensamblaje del aplicador al sistema de secado: Pruebas de rendimiento del secado y mejora con agua desionizada.
- Pruebas de rendimiento del secado y mejora con zumo diluido.

En la tabla 2.1, se muestra con detalle las experiencias realizadas en los ensayos de vaporización y de secado del vaporizado.

Tabla 2.1. Diseño experimental de las distintas experiencias realizadas el estudio.

Tanda	Fluido/Dispositivo	Variables
Vaporización		
1	Agua desionizada/sin válvula	Vueltas del capilar, diámetro de iris, potencia de microondas, caudal del fluido
2	Agua desionizada/con válvula	Vueltas del capilar, diámetro de iris, potencia de microondas, caudal del fluido.
3	Agua desionizada/con boquilla	Diámetro interno, diámetro de iris, diámetro de la vuelta y número de vueltas del capilar, potencia de microondas, caudal del fluido.
4	Zumo diluido/con boquilla	Diámetro interno y número de vueltas del capilar, potencia de microondas, caudal y dilución del fluido
Secado		
5	Agua desionizada	Número de vueltas y diámetro de vuelta del capilar, potencia de microondas, caudal del fluido y del aire.
6	Zumo diluido	Número de vueltas y diámetro de vuelta del capilar, potencia de microondas, caudal del fluido y del aire, dilución del fluido

2.4. Muestras

Agua desionizada: El agua desionizada que se ha utilizado en las pruebas era obtenida de un dispositivo que se encontraba en los laboratorios de ITACA.

Zumo de manzana diluido: La materia prima utilizada fue zumo de manzana de una marca comercial. Fue adquirido en una tienda local. Se seleccionó por aspecto visual (clarificado) y su contenido en sólidos. Este zumo no tiene

partículas en suspensión, es un zumo clarificado con un contenido en sólidos solubles (en su mayoría azúcares) de un 12,4%.

Preparación de las muestras: El volumen de muestra necesario para los ensayos del día era preparado al instante y todo de una vez, a temperatura ambiente, minutos antes de realizar los ensayos. La dilución se realizaba utilizando el zumo comercial puro guardado siempre en nevera llevándolo a la concentración deseada mediante la adición de agua desionizada, enrasando en un matraz aforado.

2.5. Desarrollo del proceso de vaporización con el aplicador microondas.

El objetivo de la aplicación de microondas, era conseguir que se provocase una sobrepresión del fluido que circulaba por el interior de un circuito capilar de PEEK (muy bajas pérdidas dieléctricas y temperatura de trabajo hasta 260°C), de forma que éste alcanzase una temperatura de 120-130°C. Por tanto cuando saliera el fluido fuera del conducto a la presión atmosférica se produjese una vaporización muy rápida (evaporación flash) continua y abundante, consiguiendo su atomización a su vez.

El desarrollo del proceso durante los ensayos fue el siguiente: Desde un pequeño depósito con muestra líquida, mediante la impulsión con la bomba peristáltica, se aportaba un determinado caudal que era introducido en la cavidad del aplicador irradiada por las microondas, mediante un circuito de tubo capilar de determinado diámetro, longitud y número de vueltas. Establecido el flujo de muestra, se ponía en marcha el microondas a una potencia establecida para el ensayo y se sintonizaba utilizando el cortocircuito manual, controlando el proceso mediante la carta Smith. Por la acción de las microondas, a la salida del capilar, se producía la vaporización, visualizando su cantidad y regularidad y la presión obtenida. La potencia, caudal de fluido, tipo de iris, configuración del capilar eran determinados según los resultados que se iban obteniendo.

Como se ha comentado, la muestra fluida debe alcanzar una presión suficiente y temperatura para que su vaporización sea continua e instantánea a la salida del conducto, entonces para ayudar a alcanzar esta presión y regularla se han probado con dos dispositivos diferentes: Una válvula y una boquilla.

En este desarrollo se ha utilizado primero como fluido agua desionizada y después se probó con zumo de manzana a diferentes tipos de concentración.

2.5.1 ENSAYOS REALIZADOS

Todos los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Microondas a una humedad y temperatura ambiente. Para los ensayos que se iban a realizar durante el día, se podían cambiar determinados componentes del proceso (el diámetro interior de tubo capilar, diámetro del iris, número de vueltas de tubo capilar y diámetro de cada vuelta de tubo) que se esperaba iban a dar mejores resultados. Asimismo durante el desarrollo del experimento se podía ir ajustando las variables de proceso como la potencia de microondas y caudal de fluido, teniendo como controles del proceso la observación de la carta Smith (indica grado de absorción de las microondas, estado del fluido), la presión generada y la cantidad de vapor producida, que daban un criterio sobre los resultados (si vaporiza o no, cantidad de vapor, estabilidad de proceso) y también si era necesario su sintonización mediante el cortocircuito manual. Con

estos ensayos se obtuvieron unos parámetros de funcionamiento: potencia de microondas, caudal de fluido, longitud del capilar, orificio del capilar, etc.

Se empezaron estos ensayos con agua desionizada, como paso necesario a conseguir un buen vaporizado y destinado a mejorar el aplicador y obtener unos datos que nos permitiera pasar a los ensayos de vaporización de un fluido más complejo como el zumo de manzana, con más garantías de éxito.

2.5.2. VAPORIZACION DE AGUA DESIONIZADA

Tal como se ha dicho anteriormente, se empezaron los ensayos con pruebas con agua desionizada. Conforme se iban desarrollando las pruebas se probaron dos dispositivos (válvula y boquilla) con objeto mejorar el vaporizado a la salida del tubo capilar.

A. Sin válvula a la salida

El planteamiento inicial era conseguir una buena vaporización sin la ayuda de ningún dispositivo a la salida del capilar que regulase el flujo y la presión del vaporizado y conocer con qué tipo de componentes y variables de proceso se podía obtener de la mejor forma. Los resultados obtenidos nos llevaron a la búsqueda de un dispositivo que permitiese una mejora en este aspecto.

B. Con válvula a la salida

Como se ha comentado en el apartado anterior, se buscó mejorar el proceso colocando un dispositivo a la salida del capilar que incrementase la presión interior mecánicamente (válvula de presión BPR-1 de regulación manual). Esta posibilidad y poder controlar la que es generada por las microondas al incidir sobre el fluido, se cree que será adecuado para mejorar el vaporizado.

C. Con variación del diámetro a la salida (boquilla) (seleccionada)

En vista de los resultados, se planteó cambiar la válvula, sin embargo, no se encontró ningún fabricante que tuviera un dispositivo adecuado a nuestros requerimientos.

Tras revisión de la literatura, se encontró un estudio en el campo de la nebulización térmica para espectrometría atómica, el realizado por Grindlay et al., (2008), donde expone que el uso de una boquilla podría mejorar la vaporización de un fluido a la salida de un circuito capilar. Esta idea de la boquilla parecía oportuna, por tanto se planificó realizar una serie de pruebas con un dispositivo similar al descrito en el estudio de Grindlay, que se adaptase a este proceso de vaporizado.

Los resultados que se obtuvieron con estos ensayos utilizando boquilla fueron bastante buenos por lo que se ensayó este procedimiento con zumo diluido manzana.

2.5.3 VAPORIZACION DE ZUMO DILUIDO DE MANZANA

Los resultados obtenidos de vaporización con boquilla de agua desionizada, han sido prometedores pues se ha conseguido un gran rendimiento y estabilidad. Por esto, se continuó el trabajo para conseguir lo mismo con zumo diluido de manzana. La metodología de trabajo ha sido muy similar a la que se siguió en los ensayos con agua desionizada. Las variaciones más importantes en el procedimiento fueron:

- Ir directamente a valores de potencia y caudal donde se obtuvieron buenos resultados con agua desionizada.
- Se ha ensayado con un único tamaño de iris de 27 mm y 30 mm de diámetro de vuelta de la espiral del circuito capilar.
- El uso de otros diámetros internos de capilar (0,25 y 0,75 mm) y desechar el ensayo con el capilar de 1 mm debido a sus pobres resultados.
- El número de vueltas de capilar han sido en casi todos los casos de 3.

Aunque estos ensayos no dieron unos resultados tan buenos como los conseguidos con agua, se creyó interesante estudiar su comportamiento en el proceso de secado porque se puede conocer su rendimiento, y si es afectado por el proceso.

2.6. Desarrollo del proceso de secado del vaporizado mediante los ensayos en la unidad completa de secado

Las pruebas de vaporización dieron buenos resultados con el agua desionizada, sin embargo los resultados no han sido tan buenos y presentando más problemas con zumo diluido, pero si se creyó que eran de interés de estudio. Por lo tanto, se abordó la siguiente fase de pruebas para el desarrollo del proceso de secado del vaporizado para ambos fluidos.

El desarrollo del proceso de secado se realizó de la siguiente forma: Se instaló el prototipo en la unidad de secado de la forma que se creyó más apropiada y con los necesarios ajustes en el montaje para que el chorro de vapor generado fuera proyectado adecuadamente hacia la cámara de secado. Después de esto, había que poner el equipo en régimen (aceptable vaporización, regularidad y estabilidad de proceso). Una vez conseguida la puesta en régimen, se operaba finamente con los parámetros, para que el chorro de vapor (expandido y atomizado), siguiera el proceso de secado de la forma más adecuada. Una parte de este vapor se quedaba condensado en la cámara y otra parte era empujado, circulando en dirección del ciclón separador, por la corriente de aire (graduable manualmente) a temperatura ambiente que era aplicada en la entrada de la cámara de secado. El vapor al llegar al ciclón, escapa en su mayor parte por la abertura que tiene por arriba.

2.6.1 ENSAYOS REALIZADOS

Todos los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Microondas a una humedad y temperatura ambiente. Para los ensayos que se iban a realizar durante el día, se podían cambiar determinados componentes del proceso (número de vueltas de tubo capilar, diámetro de cada vuelta de tubo) que se esperaba iban a dar buenos resultados. Asimismo durante el desarrollo del experimento se podía ir ajustando las variables de proceso como la potencia de microondas y también caudal de la muestra y del aire, teniendo como controles del proceso la observación de la carta Smith (indica grado de absorción de las microondas, estado del fluido), la presión generada y la cantidad de vapor producida, que daban un criterio sobre el estado del proceso (si vaporiza o no, cantidad de vapor, estabilidad de proceso) y también si era necesario su sintonización mediante el cortocircuito manual. Para el zumo diluido de manzana, se determinaba el grado de dilución en función de los resultados que se iban obteniendo.

- Agua desionizada

Si se había conseguido la estabilización y una adecuada vaporización y se había observado (control visual del proceso) que el dispositivo de secado había realizado de una forma apropiada su cometido, se realizaba una valoración de su rendimiento mediante un balance.

- Zumo diluido de manzana

Indicar en este apartado que el grado de dilución del zumo se realizaba en función de los resultados que se iban obteniendo, pero con el criterio de ir bajando concentraciones en vista de cómo habían ido los resultados los ensayos de vaporización.

Se ha realizado valoración del rendimiento del secado cuando se ha conseguido poner el proceso en régimen.

2.7. Criterio de transformación de los resultados en los ensayos

Como ya se ha comentado, la vaporización se evaluó visualmente, por tanto es una valoración cualitativa que se creyó necesario cuantificar para comprender mejor el proceso y los resultados.

En la figura 2.2 se muestra el criterio de valoración que se ha seguido para la transformación de los valores cualitativos del grado de vaporización a valores cuantitativos. Esta transformación está basada en los valores utilizados de caudal aportado por la bomba.

Líquido	Líqu/Vap↓	Líqu/Vap	Líqu/Vap↑	↑	↑↑	Mejorable	Mejorable↑	Bueno	Bueno↑	OK
0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4

Figura 2.2. Criterio conversión valores cualitativos en cuantitativos del grado de vaporización.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados ensayos de vaporización de las muestras fluidas.

Para conseguir una buena vaporización hay que tener en cuenta que la muestra fluida debe permanecer el tiempo necesario expuesta al efecto de las microondas en su paso por la cavidad, por tanto, es muy importante la configuración del capilar. Entonces, durante los experimentos se han ido confeccionado distintos circuitos de tubo capilar. También se han ido probando otro tipo de elementos accesorios al proceso (válvulas, boquilla) según se iban obteniendo resultados, tal como se ha comentado en la metodología.

3.1.1. VAPORIZACIÓN DE AGUA DESIONIZADA

Como ya se ha comentado, los ensayos que se realizaron para la vaporización de agua desionizada van encaminados a conseguir este proceso de una manera estable, continua y con abundante generación de vapor. Los resultados, se muestran según se ha ido desarrollando el estudio y se distribuyen en, sin válvula a la salida, con válvula y con boquilla a la salida.

A. Sin válvula a la salida

Los primeros ensayos realizados han sido sin colocar ningún dispositivo a la salida del conducto y se han realizado como si fueran un estudio previo para ir

conociendo el comportamiento del proceso, lo que ayudaría a entenderlo mejor. El capilar utilizado siempre ha sido de 1 mm de diámetro.

La tabla 3.1 muestran los valores obtenidos de la observación de la vaporización a distintos valores de potencia y caudal. Se indica también el diámetro de capilar utilizado y de la espiral del circuito, número de vueltas del circuito, así como los diámetros de iris utilizados.

Tabla 3.1. Resultados de los ensayos de vaporización de agua desionizada sin usar válvula.

		Ø CAPILAR: 1 mm			
Caudal (mL/min)		Ø vuelta: 35 mm			
Nº de vueltas:		2		3	
Iris:		30	35	30	35
POTENCIA (W)	CAUDAL				
90	1,2	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
90	1,5	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
120	1,5	↑	Líq/Vap	↑	↑
120	1,8	↑↑	↑	↑↑	↑↑
120	2,1	↑	Líq/Vap	↑	↑
150	1,5	↑	↑	↑	↑
150	1,8	↑	↑	↑↑	↑↑
150	2,1	↑	Líq/Vap	↑	↑
180	1,8	↑↑	↑	↑↑	↑↑
180	2,1	↑↑	↑	↑↑	↑↑
180	2,4	↑	Líq/Vap	↑	↑

Niveles de valoración de vaporizado (menor a mayor); Líquido, no hay vapor; Líq/Vap, hay vapor (poco); ↑ regular. ↑↑ abundante.

Estos resultados (tabla 3.1) muestran que aumentando la potencia se ha incrementado la vaporización para un caudal constante. Se obtienen valores de vaporizado interesantes a 180 W y caudales de 1,8 a 2,1 mL/min. La variación del diámetro de iris y el número de vueltas de capilar influyen en el proceso según muestran los resultados.

En la figura 3.1, se muestra una gráfica con unos resultados de vaporización (cuantificados) extraídos de la tabla 3.1. El iris es de 30 mm y el circuito capilar tiene 2 vueltas de espiral con un diámetro de vuelta de 35 mm. En el eje de abscisa se indican los valores de potencia (W) agrupados en potencias iguales. En las ordenadas se indican valores de caudal (mL/min) y vapor. Aquí se observa más claramente lo comentado para la tabla 3.1.

B. Con válvula a la salida

Estos ensayos mediante el uso de una válvula a la salida del conducto capilar se realizaron como paso siguiente. Se ha utilizado el capilar de 1 mm, los iris de 30 a 35 mm y con 2 ó 3 vueltas de capilar (diámetro 35 mm).

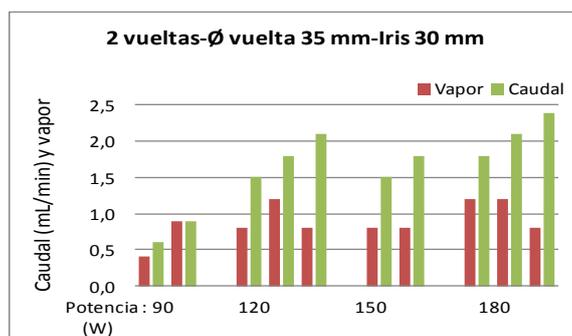


Figura 3.1. Valores relevantes de vaporización obtenidos en ensayos sin válvula a la salida.

Los resultados más relevantes obtenidos en estas pruebas se pueden resumir en: El uso de 2 ó 3 vueltas de espiral o un diámetro de vuelta de 30 ó 35 mm no se ha visto que suponga un cambio en el proceso, pero debido a la inestabilidad y las obturaciones que normalmente se producían durante la realización de los ensayos es complicado asegurar esto. Lo que si se observó es que a partir de 180 W y caudales de 1,5-1,8 mL/min empezaba a producirse un aumento de la vaporización.

También que indicar que durante las pruebas la presión no se ha mantenido constante en la mayoría de las ocasiones, con continuos vaivenes de subidas y bajadas (0,2-0,4 bares de variación), obturándose la válvula de manera continuada generando muchos problemas. Se observó que la masa de la válvula era muy grande respecto a la cantidad de fluido que circulaba a través de ella, enfriándolo a su paso y perjudicando la vaporización. Por tanto, la válvula presentó problemas de fiabilidad importantes debido a la obstrucción por tener un orificio de paso muy pequeño y a la baja temperatura de trabajo.

Posteriormente, se investigó y buscó un modelo de válvula sustitutiva, que se adaptase adecuadamente al funcionamiento del proceso. Este trabajo se realizó de manera intensiva en los catálogos multitud de fabricantes tanto nacionales como internacionales. Desgraciadamente no se encontró un dispositivo adecuado debido a la singularidad de nuestros requerimientos.

C. Con boquilla a la salida

En este apartado se exponen los resultados obtenidos con la siguiente batería de pruebas. Estas se han realizado después de sustituir la válvula por una boquilla metálica de 0,5 mm de diámetro interior, por tanto, dependiendo del capilar utilizado actuará como estrechamiento o regulador del diámetro a la salida de vapor. Aquí se probaron dos diámetros interiores de capilar (1 y 0,5 mm). Se pensaba que con un diámetro menor se podía mejorar el proceso. Por tanto, se han utilizando conductos capilares de 1 y 0,5 mm, iris de 30 a 35 mm y circuitos con 2 ó 3 vueltas de capilar (diámetro 35 mm).

- Ensayos con tubo capilar de 1 mm de diámetro interior

En general, durante estos ensayos, la presión no se ha mantenido en un valor constante y la absorción de potencia de microonda no ha sido estable sobre todo cuando se generaba mucho vapor en el proceso conforme se incrementaba la potencia.

En la figura 3.2 que viene a continuación se muestran dos gráficas de resultados cuantificados de vaporización a distintas potencias y caudales. La espiral tiene 2 y 3 vueltas y un diámetro de 35 mm.

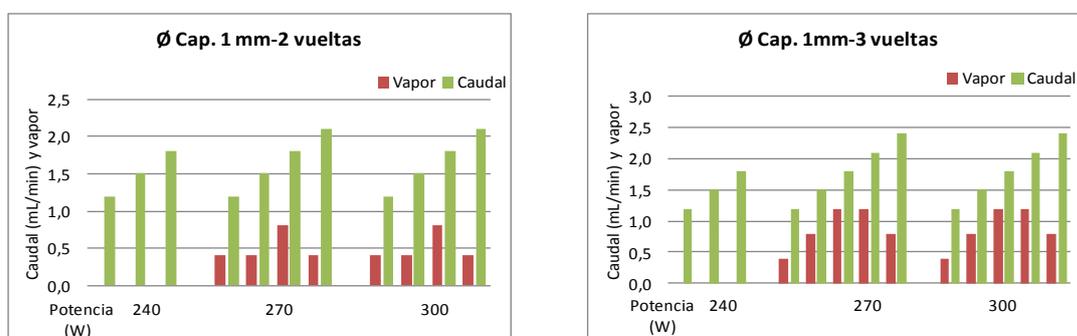


Figura 3.2. Resultados más relevantes de vaporización obtenidos. Para 2 vueltas (izquierda) y 3 vueltas (derecha).

A valores de potencia menores de 210 W, no ha habido cambio de estado remarcable del fluido, permaneciendo fundamentalmente líquido. Se obtienen resultados interesantes (figura 3.2) a potencias de 270 a 300 W y caudales de 1,8 a 2,1 mL/min, con un buen vaporizado y más regular de lo hasta ahora conseguido, indicando el manómetro una elevación de la presión y estabilidad de ésta (0,5 a 0,6 bar). La carta Smith ha indicado estabilidad y buen aprovechamiento de la potencia de microonda aplicada.

Diferentes tamaños de iris, sea de 30 ó 35 mm ha influido poco, siendo lo que ha influido con más claridad el número de vueltas del circuito capilar. El funcionamiento es sensiblemente mejor con 3 vueltas que con 2 vueltas y esto puede ser debido a que la mayor masa y mayor tiempo de permanencia del fluido con el circuito de 3 vueltas queda más equilibrado el proceso.

- Ensayos con tubo capilar de 0,5 mm de diámetro interior

Los resultados han sido en general bastante buenos, consiguiendo en determinadas condiciones, resultados satisfactorios. El sistema ha sido más estable que con el capilar de 1 mm. La combinación de uso de boquilla y diámetro 0,5 mm ha tenido gran influencia en la mejora del proceso.

A continuación en la figura 3.3, se muestran en las gráficas, unos resultados de vaporización a 300 W de potencia y distintos caudales. Los capilares son de 0,5 mm y 1 mm. La espiral tiene 3 vueltas y un diámetro de 35 mm.

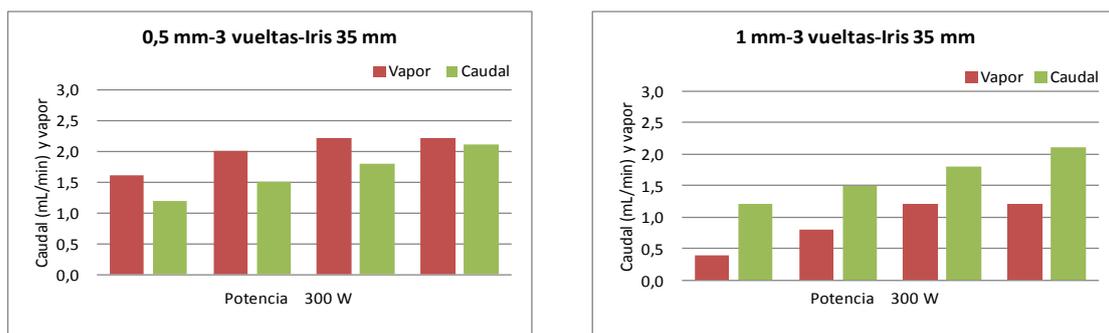


Figura 3.3. Resultados de vaporización. A la derecha, utilizando un diámetro de capilar de 1 mm. A la izquierda, utilizando un diámetro de 0,5 mm.

En la figura 3.3 se puede ver claramente el diferente resultado de vaporización que se obtiene entre el capilar de 0,5 mm y el de 1 mm. Con diferencia, se obtienen mejores resultados en el proceso, utilizando el diámetro de 0,5 mm.

En otros ensayos se ha visto que, con el iris de 35 mm, 3 vueltas de espiral de 35 mm de diámetro, valores de potencia de 270 a 300 W y de caudal entre 1,8 y 2,1 mL/min, se produce una muy buena vaporización, pero el sistema es estable solo durante periodos muy breves (de 15 a 20 s), desintonizándose, por lo que dejaba de vaporizar y había peligro de quemar el capilar o de estropear el aplicador microondas

En la figura 3.4 se muestran unos resultados de vaporización con distintos diámetros de iris y número de vueltas, a diferentes valores de potencia y caudal. El diámetro de espiral que se ha utilizado ha sido siempre de 30 mm.

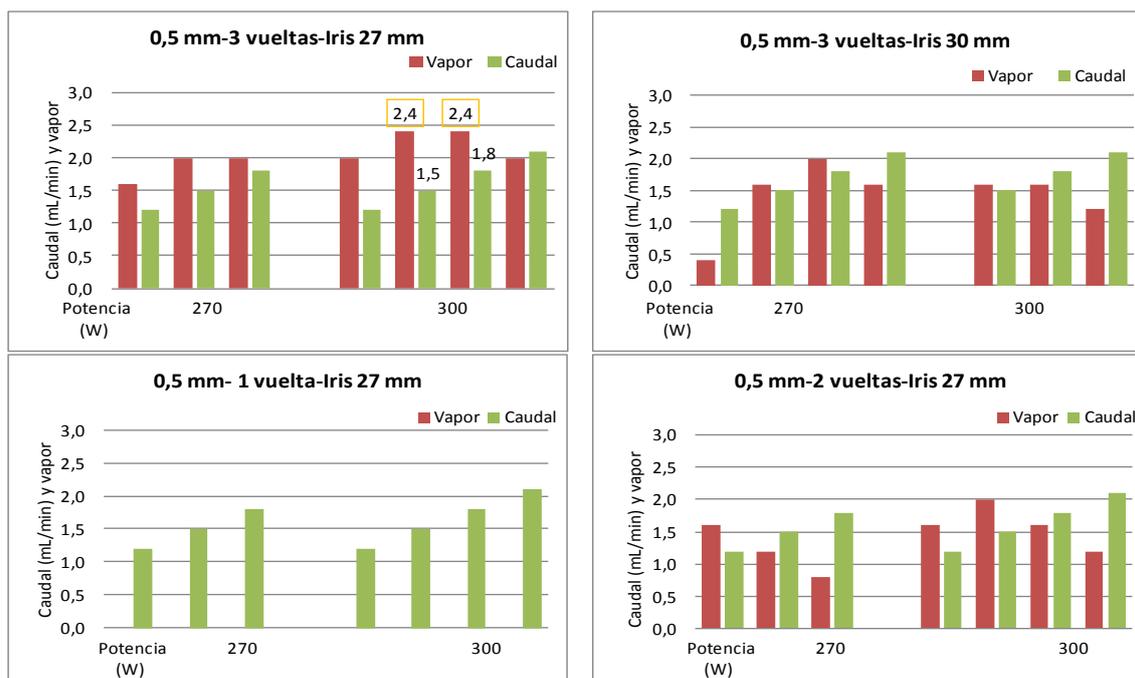


Figura 3.4. Resultados de vaporización a diferentes caudales y potencia, distintos iris y vueltas.

Según se observa (fig. 3.4), con 1 y 2 vueltas en las mismas condiciones, se obtiene menos vaporizado que con 3 vueltas. Esta menor producción de vapor puede achacarse a que no hay suficiente masa de fluido (la presión no sube mucho, alrededor de 0,2 bares). También podría influir el tiempo de permanencia del fluido, que en cada caso es diferente. Ambos factores podrían ser y podrían estar relacionados. También se observa que el tamaño de iris afecta en la mejora de la vaporización. El iris de 27 mm resultó el más idóneo.

En estos ensayos, los mejores resultados (2,4 de vaporización) son los que se han conseguido bajo las siguientes condiciones (fig. 3.4):

- Diámetro interior del capilar 0,5 mm. El circuito capilar tiene 3 vueltas de espiral (30 mm diámetro). Tamaño de iris de 27 mm
- Caudales de 1,5 y 1,8 mL/min a potencia de 300 W. Presión obtenida de 0,5 a 0,6 bar.

En estas condiciones, el tiempo que tarda la muestra en atravesar el circuito capilar por tanto el tiempo que está siendo irradiada es aproximadamente de 3,30 segundos para un volumen de 1 mL de muestra.

Hay que decir, que no está completamente establecido que la vaporización obtenida sea fruto del paso de líquido a vapor instantáneamente a la salida del conducto capilar. Puede ser que antes de su salida haya parte que ya este en fase gas. También hay que indicar que el capilar se ha quemado durante los experimentos en algunas ocasiones, sobre todo a altas potencias y en situación de precaria estabilidad (vaporización discontinua, continuos saltos del valor de la presión y la carta Smith inestable), pero cuando se ha conseguido una estabilización, este problema casi ha desaparecido.

3.1.2. VAPORIZACIÓN DE ZUMO DILUIDO DE MANZANA

El objetivo era conseguir que el proceso sea lo más efectivo, teniendo en cuenta la mejores condiciones halladas en las pruebas de vaporización de agua desionizada.

En estos ensayos, se varió en ocasiones el diámetro del capilar (0,25, 0,5 y 0,75 mm) y el número de vueltas de espiral (1, 2, 3 y 4 vueltas), siendo el iris utilizado siempre de 27 mm y el diámetro de vuelta del circuito de 30 mm, porque esta es la configuración que mejor ha resultado con vaporización de agua desionizada. Aunque se tiene la referencia de que el capilar que mejor ha funcionado es el de 0,5 mm, al ser la dilución de zumo de manzana un fluido con unas propiedades físico-químicas diferentes, marcadas por su composición (aprox. 12% de azúcares), se tomó la opción de ensayar con otros calibres. La opción de 1 mm se desechó en vista de los pobres resultados.

Inicialmente se iban probando diferentes diluciones de zumo, pero conforme se iban obteniendo resultados, se fue tendiendo a ensayar con diluciones poco concentradas, que daban mejores resultados. También hay que señalar que el capilar se ha quemado durante los experimentos con bastante frecuencia. Ha ocurrido más veces que en los ensayos realizados con agua desionizada, especialmente a altas potencias y en situación de estabilidad precaria (generalmente con diluciones concentradas). Cuando se consiguió una estabilización del proceso sin elevar la potencia a valores máximos (hasta 240 W), se fundía bastante menos.

- Ensayos vaporización de zumo con tubo capilar de calibre 0,25 y 0,75 mm

Para el calibre de 0,25 mm los resultados han mostrado que con factores de dilución de 1/5, 1/10 y 1/25 el sistema es muy inestable, con pobre vaporización y se quema el capilar con frecuencia. A diluciones más altas de 1/50 y 1/100, para 3 vueltas de espiral tampoco han dado buenos resultados. En alguna ocasión se ha conseguido un proceso estable, con valores bajos de potencia y caudal (120 W-0,9 mL/min), pero sin vaporizar apenas.

Las pruebas con el diámetro 0,75 mm, se esperaba que fueran mejor, pues al abrir del ancho de calibre se esperaba que mejorase la estabilidad del proceso. A la dilución 1/5 (para 1 y 2 vueltas de espiral), se obtiene buenos resultados con 300 W y caudales de 1,5 a 1,8 mL/min, con alta cantidad de vaporizado (llegando a subir la presión interior a 1 bar) pero el capilar se funde enseguida, no pudiendo comprobar cuanto tiempo estaría estable el proceso. Otros resultados, a dilución 1/10 y 3 vueltas de capilar, muestran que cuando se empieza a tener un proceso bueno y estable el capilar se funde enseguida, como ha ocurrido con la dilución 1/5. A dilución 1/25 con 4 vueltas se ha conseguido más estabilidad, pero ha bajado en cantidad de vaporizado.

- Ensayos vaporización de zumo con tubo capilar de diámetro de 0,5 mm

Los mejores resultados de vaporización con zumo diluido, se han obtenido utilizando el calibre 0,5 mm. Con la dilución 1/5 se llega a vaporizaciones muy altas y también a dilución 1/10, desgraciadamente, en ambos casos, el capilar se fundía rápidamente. Este hecho ya ha ocurrido anteriormente cuando se han realizado ensayos en con capilares de 0,25 mm y 0,75 mm. Al aumentar la concentración del zumo en general se absorbe más potencia de microondas en el fluido y se cree que conduce a se produzcan más problemas de fundidos.

En la figura 3.5 se muestran resultados (cualitativos) para dilución 1/100 con circuito capilar de 3 vueltas, según diferentes valores de potencia y caudal.

Dilución 1/100		∅ CAPILAR (mm)
Potencia (W)		0,5
Caudal (mL/min)		Vueltas
		3
POTENCIA	CAUDAL	
150	0,6	Mejorable
150	0,9	Bueno
180	0,9	Mejorable
180	1,2	Líqu/Vap
195	0,9	Bueno
195	1,2	Líqu/Vap

Figura 3.5. Resultados de ensayos de vaporización a dilución 1/100.

Niveles de valoración de vaporizado (menor a mayor): Líq/Vap, poco vapor; Mejorable, abundante y sistema algo estable; Bueno, abundante y sistema estable.

Se busco un compromiso (vaporización, estabilidad, no fundidos) y se obtuvo a dilución 1/100 (Figura 3.5) resultados prometedores con potencias entre 150 y 195 W a caudal de 0,9 mL/min. No se probaron potencias más altas pues la temperatura en la cavidad se incrementaba rápidamente. Se hicieron varias pruebas con diluciones de 1/25 y 1/50 pero no dieron buenos resultados.

3.2. Resultados ensayos con el sistema completo de secado.

Las pruebas de vaporización con el aplicador dieron buenos resultados con el agua desionizada, sin embargo, no han sido tan buenos y presentando más problemas con zumo diluido, pero si se creyó que eran de interés de estudio en el proceso de secado. Por lo tanto, se abordó la siguiente fase de pruebas para el desarrollo del proceso de secado del vaporizado para ambos fluidos.

En los ensayos se tuvieron en cuenta las mejores condiciones halladas en las pruebas de vaporización, por tanto, solo se utilizará el capilar de 0,5 mm y el iris de 27 mm, porque se cree que esto irá en beneficio del estudio. Entre las variables continúan, el número de vueltas de espiral (aunque se probarán principalmente con 3 vueltas), el diámetro de vuelta (aunque se usara el de 30 mm principalmente) y para el zumo diluido el grado de dilución (se tenderá a zumos poco concentrados). Los parámetros, caudal y potencia siguen por supuesto, añadiendo también el caudal de aire que arrastra el vaporizado.

Comentar, que se cree que debido a la nueva situación de instalación del prototipo en la unidad de secado, con los necesarios ajustes en el montaje para que el chorro de vapor generado fuera proyectado adecuadamente hacia la cámara de secado, ha sido motivo para no llegar a los mismos resultados de vaporización que se llegaron con el prototipo solo.

3.2.1. ENSAYOS DE SECADO DE VAPORIZACION DE AGUA DESIONIZADA

Hay que recordar (apdo.2.6), que para realizar el proceso de secado, había que poner previamente el sistema en unas condiciones adecuadas (régimen).

Los resultados obtenidos se muestran a continuación distribuidos según las vueltas de espiral del circuito que se han usado en el experimento. Para las pruebas se ha utilizado en todas la ocasiones 30 mm de diámetro de espiral.

- 3 y 4 vueltas de espiral de tubo capilar

Se probó en primer lugar, el funcionamiento del proceso con 3 vueltas de capilar que en teoría debería ser el que mejor resultados debería dar pero los resultados obtenidos no han estado a la altura de las expectativas. Puede ser

que con 3 vueltas de capilar no haya suficiente masa para que sea estable el sistema a altas potencias (saltos de presión continuos de 0,6 bares de amplitud). Esto no ocurría cuando se ha ensayado solo con el prototipo. Lo más relevante es que a 210-225 W se ha estabilizado el proceso pero la generación de vapor era baja (Líq/Vap), y no se consideró adecuado realizar una valoración del rendimiento de secado.

El sistema ganó estabilidad y cantidad de vaporizado con una vuelta más de espiral (4 vueltas). A una potencia de 240 W, caudal muestra de 1,5 mL/min y de aire 4 L/min, se llegó a unas condiciones de generación de vapor (Líq/Vap↑), con el régimen del proceso y se creyó conveniente realizar un cálculo del rendimiento del secado.

El resultado obtenido del rendimiento fue del 29% de agua eliminada. Indicar que 4 L/min es un caudal de aire bajo, pero el proceso mejor funciona, es más estable. El problema es que no llega a ser suficiente para que funcione el ciclón y se condensa lo vaporizado en la cámara, por tanto, se cree que el secado empeora, bajando el rendimiento.

- 5 vueltas de espiral de tubo capilar

Los ensayos realizados con 5 vueltas de espiral son los que mejores resultados han dado, aunque se ha tenido que realizar la puesta en régimen en muy pequeña progresión.

En la figura 3.6 se muestra en la gráfica, los valores de vaporización (cuantificados), que se han ido dando durante la puesta en régimen del proceso de secado, según diferentes valores de potencia y de caudal de muestra. El caudal de aire en casi todo el proceso de estabilización ha estado a 20 L/min y al final se ha ido subiendo en progresión hasta 28 L/min (régimen).

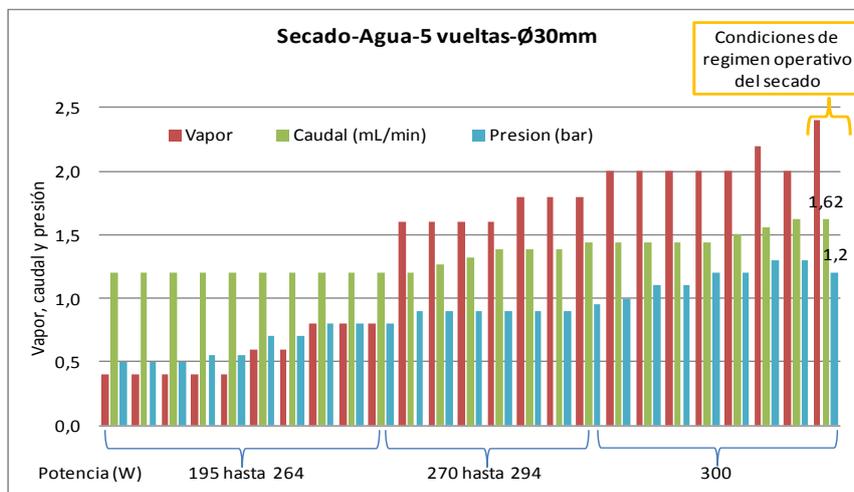


Figura 3.6. Resultados de vaporización para 5 vueltas de espiral durante la puesta en régimen.

La puesta en régimen se considera que acaba en el valor de caudal de 1,62 mL/min y 1,2 bares de presión (fig.3.6). Durante esta, en ocasiones estando sistema estable en un punto, si se incrementaba el caudal de aire (para el correcto funcionamiento del secador) el sistema se volvía inestable. Para evitar esto se tenía que dejar un tiempo (alrededor de 30 s) en ese punto, para poder volver a subir el caudal de aire al siguiente punto. Una vez llegado al punto de régimen se pudo realizar un proceso de secado completo con el consiguiente balance, y se calculó el rendimiento. El rendimiento fue del 53% de agua eliminada.

3.2.2. ENSAYOS DE SECADO DE VAPORIZACION DE ZUMO DILUIDO

El proceso ha sido más complicado de realizar con zumo diluido. Cuando vaporizaba bien era con altas potencias y bajos valores de caudal de zumo, por lo que solo se podía mantener breves periodos de tiempo (fundidos), sobre todo si se estaba utilizando zumo diluido de alta concentración. Por tanto, el grado de concentración en los ensayos se irá variando según los resultados y se tendió al final a usar zumos poco concentrados.

Los resultados se muestran distribuidos según las vueltas de espiral y diámetros usados.

- 3 y 4 vueltas de espiral y 30 mm de diámetro de vuelta

A 3 vueltas se obtuvieron resultados interesantes, a altas diluciones (1/100). Como en el proceso de secado el sistema tiene que estar en funcionamiento durante un tiempo (sobre 1,5 horas), se tiene que bajar la concentración para que el sistema resista el proceso, fundamentalmente para que el capilar no se funda. El mejor resultado conseguido fue a 270 W y 1,5-1,8 mL/min y aire a 20 L/min con una aceptable vaporización pero no era suficiente estable.

En las pruebas realizadas con 4 vueltas se empezaron los ensayos con la dilución 1/10 y después se fue bajando la concentración. El sistema se ha comportado muy inestable (subiendo la presión hasta 1,6 bares) con grandes saltos continuos de 0,4 a 1,6 bares, especialmente por encima de 220 W (caudales de muestra de 1,5 mL/min y de aire 20 L/min).

Por lo tanto, otra vuelta más de espiral, no ha supuesto una mejora importante, pero se cree que el caudal de aire utilizado ha influido en el proceso más de lo esperado debido a ser demasiado alto.

- 4 vueltas (35 mm) y 5 vueltas de espiral (30 mm de diámetro de vuelta)

Se pensó que proceso podía funcionar mejor ampliando el diámetro de vuelta (para 4 vueltas) o poniendo 5 vueltas. Se utilizó un nivel de caudal de aire más bajo de los hasta ahora empleados. Aunque el proceso arrastre de vapor empeorará si se cree que se podrá poner en régimen el proceso y conseguir algún resultado de rendimiento.

En la tabla 3.2 se muestran resultados de vaporización (cualitativo) y presión obtenidos con las configuraciones anteriormente citadas, durante la puesta en régimen del proceso, a diferentes valores de potencia, de caudal de muestra y de aire. Se utiliza un zumo con una dilución de 1/25.

Tabla 3.2. Resultados de vaporización y presión a dilución 1/25 durante la puesta en régimen.

Potencia(W)		Caudal (mL/min)		Dilución 1/25		Potencia(W)		Caudal (mL/min)		Dilución 1/25	
Aire (L/min)		Presion (bar)		Ø vuelta (mm): 35		Aire (L/min)		Presion (bar)		Ø vuelta (mm): 30	
POTENCIA	CAUDAL	AIRE	Nº de vueltas: 4		POTENCIA	CAUDAL	AIRE	Nº de vueltas: 5			
180	1,2	10	Mejorable	0,40-0,60	195	1,2	10	Liq/Vap	0,6		
195	1,2	10	Mejorable	0,40-0,60	210	1,2	8	Liq/Vap	0,4-0,6		
210	1,2	10	Mejorable	0,55	210	1,2	10	Liq/Vap	0,4-0,6		
222	1,2	10	Bueno	0,60	210	1,2	16	Liq/Vap	0,5-0,7		
222-228	1,2-1,4	10	OK	0,80-0,90	210	1,2	18	Liq/Vap	0,6-0,8		
222-228	1,5	10	OK	0,80-0,90	210	1,2	20	Liq/Vap	0,6-0,8		
					225	1,2	20	Mejorable	1,0-1,2		

Niveles de valoración de vaporizado (menor a mayor); Líq/Vap, poco vapor; Mejorable, abundante y sistema algo estable; Bueno, abundante y sistema estable; OK, muy abundante, regular y estable.

Para 4 vueltas, la puesta en régimen se consideró a 222-228 W, con caudal de muestra de 1,5 mL/min y aire de 10 L/min, y se estudió su rendimiento. Observar que se utilizó un caudal de aire de 10 L/min (tabla 3.2), no muy fuerte,

por esto parte del vapor se quedaba en la cámara de secado y se condensaba no llegando al ciclón. Si se subía más el caudal de aire se creaba inestabilidad y podía ocurrir que enfriara el vapor, condensando y cayendo como fina lluvia al fondo de la cámara de secado.

El resultado del rendimiento del proceso ha sido del 30% de zumo diluido eliminado.

Para 5 vueltas y diámetro de 30 mm y misma dilución (1/25), no se obtuvo mejor resultado que con 4 vueltas. Puede ser que el haberlo puesto en régimen con mayor caudal de aire (16-20 L/min) haya influido. Se ha calculado el rendimiento del proceso obteniendo un 21% de zumo diluido eliminado.

Se ha observado que en los componentes del circuito de secado, se quedan unas pequeñas gotitas pegajosas procedentes del secado del vaporizado, pero no llega esto al depósito del ciclón. Se cree que el secado no ha sido suficiente y el producto quedaba con alta humedad, quedando pegado en el circuito.

4. CONCLUSIONES

- Insertar a la salida del tubo capilar una boquilla metálica, ha mejorado las condiciones para un buen vaporizado.
- Se ha conseguido resultados de vaporización de agua desionizada muy buenos en varias condiciones de proceso, siendo especialmente relevantes: Potencia de 300 W, caudales de 1,5 y 1,8 mL/min. Diámetro interior del capilar 0,5 mm, con un circuito de espiral de capilar de 3 vueltas (30 mm diámetro). El iris utilizado es de 27 mm.
- Con zumo diluido los resultados de vaporización no han sido tan buenos que con agua desionizada, pero si interesantes. Con diluciones 1/5 y 1/10, buena vaporización pero el capilar se fundía rápido. Se consiguió estabilizar a baja concentración (1/100) y con potencias medias de 150-195 W, con una vaporización media. Adaptar un sistema de refrigeración para el circuito interior de la cavidad, utilizar capilar de otro material (vidrio u cerámica) más resistente a la temperatura podrían ser una serie de opciones de mejora para posteriores desarrollos. También se podría utilizar un abanico más amplio de calibres de tubo capilar.
- Lo que le está sucediendo al fluido cuando atraviesa el circuito en la cavidad no ha quedado completamente establecido. El fluido puede ser que se encuentre en estado líquido, mantenido a sobrepresión y temperaturas superiores a 100 °C. También podría ser que se encuentre en estado vapor, junto con gotitas líquidas en suspensión.
- El montaje del prototipo en la unidad completa de secado se observó que produjo una bajada en la vaporización. Una mejora puede ser diseñar un montaje más adecuado.
- La temperatura del aire utilizado en el proceso de secado era la ambiente. El uso de una corriente de aire caliente podría mejorar el proceso. El caudal era un factor de estabilidad durante el proceso de puesta a régimen.
- Se ha hecho un cálculo del rendimiento del proceso de secado de agua vaporizada. El rendimiento ha sido del 53%. Se obtiene menos rendimiento con zumo diluido (20-30%) y con muchos problemas para ponerlo en régimen y mantener la situación durante largos periodos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bailey, L.B.; Gregory, J.F. 1999. Folate Metabolism and Requirements. *Journal of Nutrition*, 129, 779–782.
- Bordera, L.; Todolí, J.L.; Mora, J.; Canals, A.; Hernadis, V. 1997. *Analytical Chemistry*, 69, 3578.
- Carr, A.C.; Frei, B. 1999. Toward a New Recommended Dietary Allowance for Vitamin C Based on Antioxidant and Health Effects in Humans. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 69, 1086–1107.
- Chan, E.W.C.; Lim, Y.Y.; Wong, S.K.; Lim, K.K.; Tan, S.P.; Lianto, F.S.; Yong, M.Y. 2009. Effects of Different Drying Methods on the Antioxidant Properties of Leaves and Tea of Ginger Species. *Food Chemistry*, 113(1):166-172.
- Cravotto, G.; Boffa, L.; Mantegna, S.; Perego, P.; Avogadro, M.; Cintas, P. 2008. Improved Extraction of Vegetable Oils Under High-Intensity Ultrasounds and/or Microwaves. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15, 898-902.
- Fito, P.; Andrés A.M.; Barat, J. M.; Albors, A. M. 2001. Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente. Universidad Politécnica de Valencia, 7-11.
- Garau, M.C.; Simal, S.; Rosselló, C.; Femenia, A. 2007. Effect of Air-Drying Temperature on Physico-Chemical Properties of Dietary Fibre and Antioxidant Capacity of Orange (*Citrus Aurantium* v. *Canoneta*) by-Products. *Food Chemistry*, Vol. 104, Issue 3, 1014-1024.
- Grindlay, G.; Gras, L.; Mora, J.; Hernadis, V. 2008. Design and Evaluation of an Improved Microwave-Based Thermal Nebulizer for Liquid Sample Introduction in Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23, 129–139.
- Gulati, A; Rawat, R; Singh, B; Ravindranath, S.D. 2003. Application of Microwave Energy in the Manufacture of Enhanced-Quality Green Tea. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol. 51(16), 4764-4768.
- Kris-Etherton, P.M.; Hecker, K.D.; Bonamone, A.; Coval, S.M.; Binkoski, A.E.; Hilpert, K.F.; Griel, A.E.; Etherton, T.D. 2002. Bioactive Compounds in Foods: their Role in the Prevention of Cardiovascular Disease and Cancer. *American Journal of Medicine*, 113, 71-88, S.9B.
- Leblanc, G. 1999. Microwave-Accelerated Techniques for Solid Sample Extraction. Current Trends and Developments in Sample Preparation, Vol. 17, N°6.
- Mayeaux, M.; Xu, Z.; King, J.M.; Prinyawiwatkul, W. 2006. Effects of Cooking Conditions on the Lycopene Content in Tomatoes. *Journal of Food Science*, Vol. 71(8), 461-464.
- Metaxas, A.C.; Meredith, R.J. 1983. Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus Ltd., London.
- Miranda, M.; Maureira, H.; Rodríguez, K.; Vega-Gálvez, A. 2009. Influence of Temperature on the Drying Kinetics, Physicochemical Properties, and Antioxidant Capacity of Aloe Vera (*Aloe Barbadensis* Miller) gel. *Journal of Food Engineering*, 91(2), 297-304.
- Nicoli, M.C.; Anese M.; Parpinel M. 1999. Influence of Processing on the Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables. *Trends Food Science Technol.* 10, 94-100.
- Nindo, C.I.; Sun, T.; Wang, S.W.; Tang, J.; Powers, J.R. 2003. Evaluation of Drying Technologies for Retention of Physical Quality and Antioxidants in Asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 36(5), 507-516.
- Ramesh, M.N.; Wolf, W.; Tevini, D.; Bogner, A. 2002. Microwave Blanching of Vegetables (Sensory and Nutritive Qualities of Food). *Journal of Food Science*, Vol. 67(1-2), 390-398.
- Tulipani, S.; Mezzetti, B.; Capocasa, F.; Bompadre, S.; Beekwilder, J.; Ric de Vos, C.H.; Capanoglu, E.; Bovy, A.; Battino, M. 2008. Antioxidants, Phenolic Compounds, and Nutritional Quality of Different Strawberry Genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56(3), 696-704.
- Yuanyuan, H; Jianchun, S; Fangmei, Y; Qihui, H; 2007. Effect of Enzyme Inactivation by Microwave and Oven Heating on Preservation Quality of Green Tea. *Journal of Food Engineering*, Vol. 78(2), 687(6).