

Pedro Fito Maupoey
Ana María Andrés Grau
José Manuel Barat Baviera
Ana María Albors Sorolla

Introducción al secado de alimentos por aire caliente

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Primera edición 2001 • Reimpresión, 2016

© Pedro Fito Maupoey
Ana María Andrés Grau
José Manuel Barat Baviera
Ana María Albors Soralla

© de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València
distribución: Telf. 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es / Ref.: 4092_02_01_03

Imprime: Byprint Percom, s.l.

ISBN: 978-84-9705-025-8
Impreso bajo demanda

Queda prohibida la reproducción, la distribución, la comercialización, la transformación y, en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de la totalidad o de cualquier parte de esta obra sin autorización expresa y por escrito de los autores.

Impreso en España

ÍNDICE

1. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS: GENERALIDADES	5
1.1. DEFINICIÓN DE LA OPERACIÓN	7
1.2. OBJETIVOS	8
1.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	9
1.4. TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PRODUCTOS AGROALIMENTARIOS	10
1.5. EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS Y PRODUCTOS AGRÍCOLAS.....	11
1.6. FUENTES DE ENERGÍA UTILIZADAS EN LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS.....	12
1.6.1. Generación de aire caliente.....	12
1.6.2. Transporte de calor por conducción	13
1.6.3. Utilización de energía radiante	13
2. TIPOS DE SECADORES UTILIZADOS EN LAS INDUSTRIAS AGROALIMENTARIAS	17
2.1. SECADORES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA: CLASIFICACIÓN	19
2.1.1. Secadores directos o convectivos	19
2.1.2. Secadores por conducción o indirectos.....	20
2.1.3. Secadores por radiación.....	20
2.1.4. Secadores dieléctricos.....	20
2.2. TIPOS DE SECADORES DIRECTOS O POR CONVECCIÓN.	21
2.2.1 Secadores de horno o estufa	21
2.2.2 Secadores de bandejas o de armario.....	21
2.2.3 Secadores de túnel.....	23
2.2.4 Secadores de cinta transportadora	25
2.2.5 Secador de torre o de bandejas giratorias	26
2.2.6 Secadores de cascada	28
2.2.7 Secadores rotatorios.....	28
2.2.8 Secadores de lecho fluidizado.....	30
2.2.9 Secadores por arrastre neumático	32
2.2.10 Secadores por atomización	34

2.3. TIPOS DE SECADORES INDIRECTOS	36
2.3.1. Secadores de bandejas a vacío	36
2.3.2. Secadores por sublimación (liofilizadores)	37
2.3.3. Secadores de tornillo sin fin.....	39
2.3.4. Secadores de rodillo	39
3. DESHIDRATACIÓN POR AIRE CALIENTE EN ALIMENTOS	43
3.1. INTRODUCCIÓN	45
3.2. OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES. VARIABLES DE OPERACIÓN	45
3.3. CURVA DE SECADO	47
3.4. VELOCIDAD DE SECADO	48
3.5. ETAPAS TÍPICAS DURANTE LA OPERACIÓN DE SECADO	49
4. EVOLUCION DEL AIRE EN EL SECADOR.....	51
4.1. UNIDAD BÁSICA DE SECADO. CONCEPTO	53
4.2. SELECCIÓN DEL TIPO DE CONTACTO SÓLIDO-AIRE.....	54
4.3. SELECCIÓN DE LA TEMPERATURA DE SECADO	55
4.4. SELECCIÓN Y CÁLCULO DE LAS CONDICIONES DEL AIRE:	56
- <i>Circulación directa adiabática</i>	56
- <i>Circulación directa no-adiabática</i>	57
- <i>Recirculación de aire</i>	58
- <i>Circulación con recalentamiento progresivo</i>	59
4.5. EJERCICIOS.....	60
5. MECANISMOS Y CINÉTICA	69
5.1. INTRODUCCIÓN	71
5.2. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE MATERIA.....	71
5.3. MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR	72
5.4. FLUJOS EN EL PERIODO DE INDUCCIÓN	75
5.5. FLUJOS EN EL PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.....	76
5.6. FLUJOS EN EL PERIODO DECRECIENTE	77
5.7. MODELOS CINÉTICOS: EQUILIBRIO Y FUERZA IMPULSORA.....	77

6. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE SECADORES	89
6.1. INTRODUCCIÓN	91
6.2. DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL A SECAR	92
6.3. DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO FINAL A OBTENER	94
6.4. ELECCIÓN DEL TIPO DE SECADOR	95
6.5. ELECCIÓN DE LOS VALORES DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN	98
6.6. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE SECADO	100
6.7. DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DEL SECADOR	107
6.8. NECESIDADES DE CALOR EN EL SECADOR.....	108
6.9. ELECCIÓN FINAL Y DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO DE SECADO.....	108
6.10. CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE SECADO.....	109
6.11. PUESTA EN MARCHA DE UN EQUIPO	110
6.12. MEJORAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN EQUIPO YA EXISTENTE	110
7. DISEÑO DE SECADORES CON CONDICIONES DEL AIRE DE SECADO CONSTANTES	111
7.1. INTRODUCCIÓN	113
7.2. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE SECADO EN PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE	115
7.3. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE SECADO EN PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE.....	116
7.3.1. La disminución de la velocidad de secado responde a la ecuación de una recta.....	116
7.3.2. En el período de velocidad decreciente el alimento tiene un comportamiento difusional	116
7.3.3. La disminución de la velocidad de secado con el contenido de humedad del sólido responde a una única curva empírica	117
7.3.4. La disminución de la velocidad de secado no se puede ajustar a ninguna ecuación, y por lo tanto únicamente se puede disponer en forma de gráfica	117

7.3.5. En el periodo de velocidad de secado decreciente hay dos o más etapas.....	120
7.4. PROBLEMAS	120
8. DISEÑO DE SECADORES CON CONDICIONES DEL AIRE DE SECADO VARIABLES	145
8.1. INTRODUCCIÓN	147
8.2. PLANTEAMIENTO DE LOS BALANCES DE MATERIA	147
8.2.1. Circulación en contracorriente.....	147
8.2.2. Circulación en paralelo	149
8.3. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE SECADO.....	151
8.3.1. Cálculo del tiempo de secado si se dispone de ecuaciones.....	152
8.3.2. Cálculo del tiempo de secado si se dispone de gráficas.....	156
8.3.3. Cálculo del tiempo de secado por un método mixto	158
8.4. SIMPLIFICACIÓN DEL CÁLCULO DEL TIEMPO DE SECADO EN CONDICIONES DE TRABAJO SINGULARES	158
8.4.1. Secadores adiabáticos	159
8.4.2. Secadores a temperatura constante.....	162
8.4.3. Secadores de $(X_i - X)$ constante	167
8.5. PROBLEMAS	169
NOMENCLATURA.....	199
BIBLIOGRAFÍA.....	201
ANEXOS	203
DIAGRAMA DE MOLLIER.....	205
TABLAS PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA LÍQUIDA.....	207
ABACOS PARA DETERMINACIONES DIFUSIONALES:	
• <i>ESFERA</i>	209
• <i>CILINDRO</i>	210
• <i>LÁMINA</i>	211

CAPÍTULO 1

DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS: GENERALIDADES

1.1. DEFINICIÓN DE LA OPERACIÓN	7
1.2. OBJETIVOS	8
1.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	9
1.4. TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PRODUCTOS AGROALIMENTARIOS.....	10
1.5. EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS Y PRODUCTOS AGRÍCOLAS.....	11
1.6. FUENTES DE ENERGÍA UTILIZADAS EN LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS.....	12

1.1. DEFINICIÓN DE LA OPERACIÓN

La deshidratación es una de las técnicas más antiguamente utilizada para la conservación de alimentos. El secado al sol de frutas, granos, vegetales, carnes y pescados ha sido ampliamente utilizado desde los albores de la Humanidad proporcionando al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencia. Hoy en día la industria de alimentos deshidratados constituye un sector muy importante dentro de la industria alimentaria extendido por todo el mundo. El tamaño de las instalaciones varía desde simples secadores solares hasta grandes y sofisticadas instalaciones de secado. En el mercado puede encontrarse una amplia variedad de productos deshidratados (vegetales, frutas, carnes, pescados, cereales y productos lácteos) o formulados a partir de ingredientes deshidratados como es el caso de las salsas y sopas en polvo.

Generalmente, se entiende por deshidratación la operación mediante la cuál se elimina total o parcialmente el agua de la sustancia que la contiene. Esta definición puede ser aplicada a sólidos, líquidos o gases y tal como está expresada puede servir para describir varias operaciones unitarias como la evaporación, la adsorción, etc. Sin embargo, su tratamiento teórico y la tecnología empleada las diferencian completamente.

La mayoría de productos agroalimentarios son sólidos por lo que se define mejor la deshidratación como la Operación Básica por la que el agua que contiene un sólido o una disolución (generalmente concentrada) se transfiere a la fase fluida que lo rodea debido a los gradientes de actividad de agua (a_w) entre ambas fases (Fig.1.1).

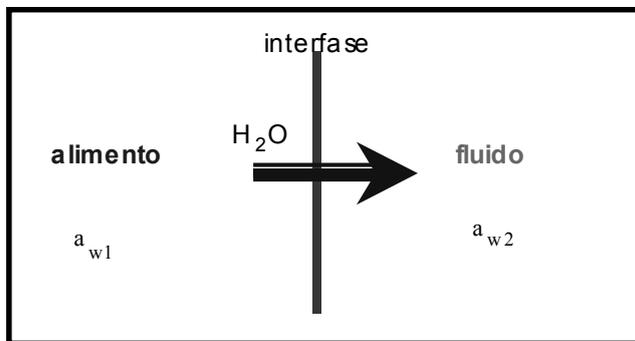


Figura 1.1. Esquema de las fases alimento-fluido entre las que se produce el transporte de agua durante la deshidratación debido a un gradiente de a_w

1.2. OBJETIVOS EN LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

Desde la antigüedad se ha reconocido que los alimentos con mayor contenido en humedad son los más perecederos, de tal manera que el control en el contenido en humedad de un producto es una herramienta para su conservación. Es común pensar que la mayor estabilidad de productos naturales está asociada con contenidos totales de humedad mínimos. Aunque esto puede ser cierto para una gran cantidad de productos, en muchos otros se ha observado que hay un intervalo óptimo de humedad no necesariamente asociado con niveles mínimos.

Aunque el contenido en humedad de un alimento puede ser un factor indicativo de su propensión al deterioro, también se ha observado que diferentes alimentos con el mismo contenido de humedad pueden ser muy diferentes en su estabilidad por lo que el concepto de contenido en humedad es insuficiente para indicar lo perecedero que es un alimento, al no tener en cuenta las interacciones del agua con otros componentes del mismo. Por esta razón, el primer objetivo de la operación de secado en cuanto a aumentar la estabilidad del producto se define en términos de depresión de la actividad de agua (a_w) y no en términos de disminución del contenido en humedad, puesto que la a_w puede ser considerada una medida indirecta del agua que está disponible en un producto para participar en las reacciones de deterioro. Ajustando la a_w y eligiendo el envase adecuado puede alargarse la vida útil de un alimento sin necesidad de refrigeración durante el almacenamiento.

La operación de deshidratación conlleva además una apreciable reducción del peso y volumen de los alimentos que se deshidratan, consiguiéndose así una importante reducción de los costes de transporte y almacenamiento de estos productos. La máxima reducción de volumen es la que se consigue al convertir alimentos líquidos en alimentos en polvo, sobretodo si el polvo obtenido se prensa en bloques o tabletas. El extremo contrario lo constituyen los alimentos sólidos liofilizados, en los que la reducción de volumen es prácticamente despreciable o muy pequeña. Entre estos dos extremos se encuentran la mayoría de los alimentos con distintos niveles de encogimiento dependiendo del tipo de producto, del método y de las condiciones de secado.

Otro de los objetivos que se persiguen con la deshidratación de alimentos es la transformación de éstos en materias primas adecuadas para el mezclado y formulación de nuevos productos, como es el caso de las sopas deshidratadas, frutas y cereales para desayuno, etc.

Sin embargo, el secado también puede provocar cambios indeseables en los alimentos. El tamaño y la forma pueden cambiar considerablemente tal y como se ha expuesto anteriormente, de manera que cuando se reconstituye el alimento, este no recupera su forma y tamaño originales. Los cambios de color también pueden darse debido a la exposición durante el secado a altas temperaturas, cambios que perduran después de la reconstitución. Otro aspecto importante es el cambio en la textura debido al encogimiento celular provocado por la pérdida de agua y las altas temperaturas así como al posible cambio de estado gomoso a vítreo. Estos

cambios pueden limitar la capacidad de los productos secos para absorber agua durante la rehidratación. En el caso de los alimentos en polvo, lo deseable es que se reconstituyan de forma instantánea y completa, tanto en líquidos calientes como fríos, y la medida en la que esto se logra depende del método y de las condiciones de secado.

Los cambios en el sabor y aroma de los productos deshidratados se deben fundamentalmente a la pérdida de componentes volátiles durante el proceso así como al desarrollo de sabores y aromas típicos de productos cocidos provocados por las altas temperaturas. Estos cambios son tanto mayores cuando más altas son las temperaturas utilizadas y/o cuanto mayor es el tiempo de secado, pudiendo minimizarse utilizando métodos de secado que impliquen el uso de temperaturas moderadas o bajas.

Las pérdidas de valor nutritivo tienen lugar en los tratamientos de preparación (lavado, pelado, troceado, etc) siendo por tanto similares a las de los productos congelados o en conserva que sufran pretratamientos similares.

Las investigaciones llevadas a cabo en este campo han permitido minimizar estos aspectos negativos de los productos deshidratados de manera que la modernización de algunas de las industrias de este sector permite ofrecer al mercado productos deshidratados de mayor calidad, esto es productos secos de rápida reconstitución que dan lugar a productos rehidratados con un excelente sabor y textura.

1.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Las dificultades y limitaciones inherentes al secado al sol pronto espolearon la imaginación del hombre primitivo a utilizar técnicas más poderosas y seguras. Así, en la Edad de Hierro ya se construyen en las zonas del Norte de Europa los primeros hornos para el secado del trigo recién cosechado.

Estas técnicas no sufrieron cambios importantes hasta la Revolución Industrial. Diderot (1751) describe muchos de los procedimientos de secado de alimentos en la Francia anterior a la revolución. Un siglo más tarde Tomlinson (1854) describe algunas de las técnicas utilizadas en la época en la deshidratación de papel, fibras naturales y algunos alimentos. En especial hace referencia a la Gran Exhibición de Londres en 1851 donde entre otros avances se presentan muestras de leche en polvo preparado por “eliminación de la porción acuosa mediante un suave calentamiento” lo que hace pensar en la posibilidad de deshidratar vegetales en hornos de secado mediante un procedimiento similar.

En 1877 se crea la oficina alemana de patentes y un año más tarde se presenta la patente de un secador calentado por radiación y 4 años después se registra la patente de un secador a vacío. A principios de este siglo Hausbrand publica “Drying of air and steam” (1901) lo que puede ser considerado como el primer intento serio de aplicación de los métodos de ingeniería al cálculo de deshidratadores. En la actualidad puede afirmarse que la deshidratación es una operación unitaria plenamente desarrollada y con unos fundamentos teóricos bien establecidos.

1.4. TÉCNICAS DE ELIMINACIÓN DE AGUA EN PRODUCTOS AGROALIMENTARIOS

La desecación puede llevarse a cabo por diferentes métodos, mecánicos y físico-químicos. Veamos de manera resumida en qué consiste cada una de ellos.

- **PRENSADO:** También llamado compresión, es una operación que tiene por finalidad separar un líquido de un sistema de dos fases sólido-líquido, comprimiendo el sistema en condiciones que permitan al líquido fluir y salir mientras el sólido queda retenido entre las superficies compresoras.
- **CENTRIFUGACIÓN:** Al aplicar a un material mojado una fuerza centrífuga suficientemente elevada, el líquido contenido en el material se desplaza en la dirección de la fuerza, produciendo así una separación del líquido y del sólido.
- **EVAPORACIÓN SUPERFICIAL:** Cuando un producto se somete a la acción de una corriente de aire caliente, el líquido que contiene se evapora aumentando su contenido en el aire. Se produce así una desecación. Este es el método más utilizado, también llamado deshidratación por aire caliente.
- **ÓSMOSIS:** Cuando un producto se sumerge en una disolución concentrada de sal o azúcar, se produce un flujo de agua desde el interior de las células del alimento hacia la disolución más concentrada a través de una membrana semipermeable (membrana celular). Este flujo se establece a causa de una diferencia de potencial químico del agua en el alimento y en la solución que lo rodea.
- **LIOFILIZACIÓN:** En esta operación, el líquido a eliminar, previamente congelado, se separa del producto que los contiene por sublimación. De ahí que sea necesario partir del material congelado y trabajar en condiciones de vacío.
- **ABSORCIÓN:** La absorción es una operación aplicada a gases, en la que uno o varios componentes de una mezcla gaseosa se disuelven en un líquido. En el caso de la desecación, el componente que se solubiliza es el vapor que se quiere eliminar del gas en cuestión. Como ejemplo puede citarse la desecación de gases mediante ácido sulfúrico.
- **ADSORCIÓN:** Es difícil una definición simple de adsorción por lo que nos limitaremos a dar un ejemplo: la eliminación del agua contenida en el aire mediante adsorbentes como el gel de sílice.
- **CONGELACIÓN:** Cuando se congela una sustancia que contiene un líquido, éste se separa paulatinamente en forma sólida produciendo una concentración del material que contenía disuelto o bien, cuando se encuentra en cantidades pequeñas, desecando el material.

De todas estas técnicas, las más utilizadas en la deshidratación de productos agroalimentarios son la **evaporación superficial** (secado por aire caliente, secado a vacío, secado solar y secado por microondas), la **deshidratación osmótica** (convencional, a vacío o por pulsos de vacío) y la **liofilización**. En ocasiones estas técnicas se combinan para la obtención de un determinado producto (Deshidratación osmótica + secado por aire caliente), o bien constituyen operaciones previas o pretratamientos en un proceso (ej: deshidratación osmótica como pretratamiento para la elaboración de mermeladas).

1.5. EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS Y PRODUCTOS AGRÍCOLAS

Frente a otros procedimientos de preservación de alimentos, la deshidratación presenta algunas ventajas importantes tal y como se ha comentado anteriormente (fácil embalaje y almacenamiento; ahorros considerables en el transporte, facilidad de utilización con otros métodos combinados en la producción de alimentos de humedad intermedia). Estas ventajas son especialmente interesantes en países en vías de desarrollo. Sin embargo, los consumos de energía utilizada en los actuales procesos de deshidratación son muy importantes.

Existen varias soluciones posibles:

- a) Modificación de los procesos y las técnicas de deshidratación actualmente utilizadas. En este sentido, la "eficacia" de los deshidratadores industriales deberá ser modificada con objeto de buscar un máximo rendimiento energético en los mismos. Esta es la tendencia de los ensayos que actualmente se realizan para el secado de productos a temperatura ambiente.
- b) Utilización de energías alternativas. De todas las energías alternativas, la utilización de subproductos agrícolas directamente como combustibles y de energía solar parecen ser las que más posibilidades presentan. Los subproductos agrícolas pueden dividirse en general en dos grandes grupos: restos de plantas que tras la recolección quedan habitualmente en el campo y subproductos de la industrialización de los productos agrícolas. La valoración de residuos sólidos orgánicos es una tendencia muy actual, que algunos consideran incluso como la energía del futuro.

Dada la importancia que tienen los aspectos energéticos en las operaciones de deshidratación se abordan en el siguiente apartado los aspectos más relevantes relacionados con las distintas fuentes de energía utilizadas en estos procesos.

1.6. FUENTES DE ENERGÍA UTILIZADAS EN DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

Uno de los criterios de clasificación de tipos de secadores se basa en la manera de transmitir el calor, fundamentalmente, por convección, conducción y radiación. Los distintos mecanismos de transporte de calor implicados en el secado van a repercutir notablemente en la cinética del proceso y por tanto en los costes totales, pero para asegurar esto último deberá tenerse en cuenta además qué fuentes de energía pueden ser utilizadas para el funcionamiento de los equipos de secado.

En el secado convectivo el calor se transfiere al sólido que se está secando mediante una corriente de aire caliente que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua es también el agente transportador del vapor de agua que se elimina al sólido. En este tipo de secadores los aspectos energéticos se evaluarán por tanto atendiendo a la fuente de energía utilizada para la generación de aire caliente.

1.6.1. Generación de aire caliente

En los secadores convectivos, el aire caliente es impulsado a través del secador por medio de ventiladores. Las fuentes de energía utilizadas para calentar el aire son muy variadas, entre ellas el gas natural ofrece mayor flexibilidad y una respuesta más rápida a menor coste, y también permite trabajar a temperaturas más altas. Sin embargo los requerimientos de seguridad son muy estrictos o rigurosos. El propano tiene características similares al gas natural pero es más caro.

La mayoría de los secadores son calentados con vapor evitando así el contacto del producto que se está secando con los productos procedentes de la combustión. Las temperaturas que se consiguen en este caso son limitadas (normalmente entorno a los 150°C), sin embargo, presentan con frecuencia problemas de mantenimiento por obstrucción de las aletas del intercambiador de calor debido a la formación de depósitos.

La combustión directa de aceite se utiliza en ocasiones en los procesos industriales, pero no es aplicable al secado de alimentos debido al riesgo de contaminación.

El aceite caliente (bombeado desde un calentador externo hacia los intercambiadores de calor) ofrece mayores temperaturas que el vapor sin los riesgos de la presión asociada al vapor. Los costes iniciales son mayores pero no presentan pérdidas por condensación por lo que la eficacia global de energía es mayor.

El calentamiento eléctrico rara vez se usa para la generación de aire caliente debido a su baja eficacia y elevado coste. Sus aplicaciones están generalmente limitadas a aquellos casos en los que se requieren temperaturas muy altas para el secado de productos en los que la contaminación debida a los productos de la combustión deba ser evitada.

La combustión indirecta de gas o aceite dentro de tubos radiantes tampoco se usa mucho debido a su baja eficacia, a su lenta respuesta y elevados coste en materiales e ingeniería.

1.6.2. Transporte de calor por conducción

El transporte de calor por conducción o secadores indirectos son más apropiados para productos finos o sólidos muy húmedos (líquidos pastosos o viscosos). El calor de evaporación se proporciona a través de superficies calentadas (en reposo o en movimiento) colocadas directamente en contacto con el material a secar. El calentamiento de estas superficies se realiza normalmente mediante vapor. El agua evaporada se elimina mediante una operación de vacío o a través de una corriente de gas cuya función principal es la de eliminar agua (y no calentar como es el caso de los secadores convectivos). Para sólidos sensibles al calor se recomienda la eliminación del agua mediante una operación de vacío. La eficiencia térmica en los secadores por conducción es bastante alta dado que no existen tantas pérdidas de entalpía como en el caso de los secadores convectivos. Como ejemplos de secadores indirectos pueden citarse los secadores de palas para el secado de pastas, los secadores rotatorios con tubos internos de vapor y los secadores de tambor para el secado de compuestos acuosos.

En muchos casos lo más eficaz es combinar este sistema de calefacción con el calentamiento por aire. Los equipos que disponen de varios sistemas de calefacción tienen como ventaja su versatilidad, ya que pueden trabajar con uno u otro sistema y con ambos, según el material que se desee secar.

1.6.3. Utilización de energía radiante

Energía solar

El secado solar al aire libre ha sido utilizado desde tiempos inmemorables para el secado de carne, pescado, madera y otros productos agrícolas como medio de conservación. Sin embargo, para la producción a elevada escala industrial el secado solar presenta ciertas limitaciones, entre las cuales pueden destacarse el elevado coste de mano de obra, equipos de grandes superficies, dificultades en el control del proceso de secado, posibles degradaciones debido a reacciones bioquímicas o microbiológicas, infección por insectos, etc. Con objeto de aprovechar los beneficios de la fuente de energía limpia y renovable proporcionada por el sol, se han realizado numerosos intentos en los últimos años para desarrollar el secado solar principalmente para la conservación de productos agrícolas y forestales.

Entre las ventajas que presenta el secado solar, la más destacable es la energía que utiliza (limpia, renovable y que no puede ser monopolizada). Sin embargo no puede olvidarse la dificultad que entraña el carácter periódico de la radiación solar, dificultad que por otra parte puede solucionarse utilizando acumuladores de calor o utilizando una fuente de energía auxiliar. Incluso durante los periodos de

radiación existen ciertas dificultades, como por ejemplo que la intensidad de la radiación incidente es función del tiempo. Esta es una circunstancia que requiere una estrategia de control adecuado y los medios necesarios de control. Otro problema es el originado por la baja densidad de radiación solar, que requiere el uso de grandes superficies colectoras.

Un aspecto importante para la utilización de la energía solar es el coste y la rentabilidad. La energía solar puede ser utilizada de manera rentable para el secado solo si el objetivo del proceso puede coordinarse con las características específicas de la radiación solar. Por tanto, las circunstancias geográficas que determinan el número de días soleados al año y la intensidad de radiación incidente diferencian varias zonas de la Tierra.

La relativamente pequeña densidad de flujo de energía solar implica que éste tipo de energía es más adecuado para procesos de secado que presenten pequeñas demandas de energía.

Calentamiento por infrarrojos

El calentamiento por infrarrojos (IR) durante el secado de productos, no es un método muy común, pero su aplicación se ha incrementado en los últimos años. Aunque este tipo de transmisión de calor se utilizó de forma accidental en el pasado, acompañando otros tipos de transferencia de calor durante el secado, los secadores por infrarrojos se diseñan en la actualidad para utilizar el calor radiante como fuente primaria de energía.

Las aplicaciones más frecuentes del secado por IR son los procesos de secado de películas de recubrimiento y membranas, y para corregir perfiles de humedad en el secado de papel y tablas de madera. En la bibliografía pueden encontrarse trabajos teóricos y a escala de laboratorio sobre resultados de secado por IR en pinturas, recubrimientos, adhesivos, tinta, papel, telas, etc. Sin embargo, no son muy frecuentes los estudios del secado por IR aplicado a alimentos. La mayoría de los datos publicados sobre alimentos proceden de la Unión Soviética, los Estados Unidos y países del Este. Ginzburg describió el secado de granos, harinas, vegetales, pasta, carne y pescado y mostró que el calentamiento por IR podría tener mucho éxito en su aplicación en alimentos. Sandu planteó como ventajas del secado por IR en alimentos, su versatilidad, sencillez de los equipos requeridos, su fácil combinación con el secado convectivo, conductivo y microondas, y también un ahorro importante de energía.

Calentamiento dieléctrico y por microondas.

Los términos dieléctrico y microondas son algo confusos y deben ser definidos lo mejor posible. Lógicamente el término calentamiento dieléctrico puede ser aplicado a todas las frecuencias electromagnéticas superiores o iguales al espectro de infrarrojos. Generalmente se dice que el calentamiento dieléctrico se realiza a

frecuencias entre 1 y 100 MHz, mientras que el calentamiento por microondas funciona entre 300 MHz y 300 GHz. Aunque los principios básicos de calentamiento y secado en frecuencias dieléctricas y microondas son los mismos, los métodos de generación y equipos son diferentes.

Un hecho crucial que debe tenerse siempre presente es que “microondas y dieléctricos” no son formas de calor sino formas de energía que se manifiesta como calor a través de su interacción con la materia. Es como si esta energía hiciese que los materiales se calentasen por ellos mismos.

Calentar y secar con energía microondas y dieléctrica es claramente diferente al calentamiento y secado convencionales. Mientras los métodos convencionales dependen sobretodo de la lentitud del calentamiento desde la superficie del material al interior debido a un gradiente de temperatura, el calentamiento con energía dieléctrica y microondas es un calentamiento global debido a la interacción del campo electromagnético con el material como uno todo. El calentamiento sucede casi instantáneamente y puede ser muy rápido. La rapidez de calentamiento puede ser una ventaja y puede realizarse en segundos o minutos lo que podría tardar minutos, horas e incluso días con un método de calefacción convencional.

Los parámetros que gobiernan el calentamiento son: la masa del material, su calor específico, propiedades dieléctricas, geometría, mecanismos de pérdida de calor y la eficiencia acoplada, es decir la relación entre la potencia aplicada y la potencia absorbida por el material.

Una lista de **ventajas** de **calentamiento** por microondas y dieléctrico incluiría lo siguiente:

- La rapidez del proceso.
- Calentamiento uniforme.
- La eficiencia de conversión de energía. En este tipo de calentamiento, no se invierte energía en calentar el aire, las paredes del horno, u otros elementos, lo cuál puede conducir a un ahorro importante de energía.
- Mejor y más rápido proceso de control. La naturaleza instantánea del “on-off” de calentamiento y la facilidad para cambiar el grado de calentamiento controlando la potencia del generador implica rapidez, eficiencia, y control exacto del calentamiento.
- Requerimientos de espacio menores debido a la rapidez de calentamiento.
- Calentamiento selectivo. El campo electromagnético generalmente interacciona con el disolvente, no con el sustrato. Por lo tanto, es el agua lo que se calienta y se elimina, mientras que el sustrato es calentado primordialmente por conducción. Esto también evita el calentamiento del aire, paredes del horno, etc.

- La calidad de los productos puede ser mejorada. Dado que no se generan elevadas temperaturas en la superficie, no tienen lugar sobrecalentamientos y encostramientos, tan frecuentes en los métodos de calentamiento convencionales.
- Muchas reacciones químicas deseables y efectos físicos son promovidos por el calor generado por este método, de cara a procesos como el ahumado, secado, mezclado, desnaturalización de proteínas, almidón, gelatinización y similares.

La aplicación de microondas y dieléctricos no solo resulta ventajoso respecto al calentamiento sino también en lo referente al secado. Los mecanismos para secar con energía microondas y dieléctricos son bastante diferentes a los secadores ordinarios. En los secadores ordinarios, la humedad es rápidamente vaporizada en la superficie y el agua del producto sigue difundiendo lentamente hacia la superficie. Aunque la fuerza impulsora para el calentamiento es el gradiente de temperatura, para la transferencia de masa es el gradiente de concentración de masa existente entre el interior y la superficie seca. Este es frecuentemente un proceso lento, difusión limitada, que requiere altas temperaturas externas para generar las diferencias de concentración requeridas.

Con la generación interna de calor, en sistemas de microondas y dieléctricos, la transferencia de masa es primordialmente debida al gradiente total de presión establecido a causa de la rápida generación de vapor dentro del material. La mayor parte del agua es vaporizada antes de abandonar la muestra. Si la muestra está inicialmente muy húmeda y la presión dentro de la muestra aumenta muy rápidamente, el líquido puede ser eliminado bajo la influencia de un gradiente total de presión. A mayor humedad inicial, mayor es la influencia del gradiente de presión sobre el total de masa eliminada. De ese modo, tiene lugar una especie de bombeo de líquido, forzando el líquido hacia la superficie, frecuentemente como vapor. Esto contribuye a un secado muy rápido sin la necesidad de sobrecalentar la muestra.

Sin embargo, deben tenerse ciertas precauciones. Estos sistemas pueden calentar y secar rápidamente pero un calentamiento excesivamente rápido puede ser destructivo. Debe tenerse mucho cuidado para no calentar tan rápidamente y que el material se queme, chamusque o dañe e incluso que los vapores generados no puedan escapar rápidamente y pueda conducir a la ruptura de las piezas o explosión.

Cuando se seca con calentadores dieléctricos es usual combinar aire caliente con el sistema, particularmente con sistemas de microondas, dado que normalmente se mejora la eficiencia y la economía de los procesos de secado. El aire caliente por sí mismo, es relativamente eficiente en eliminar agua libre en ó cerca de la superficie, mientras la acción bombeadora de los secadores dieléctricos proporciona una manera eficiente de eliminar el agua interna libre, así como el agua ligada. Combinando estas propiedades es posible maximizar la eficacia y conseguir costes de secado bajos.

CAPÍTULO 2

TIPOS DE SECADORES UTILIZADOS EN LAS INDUSTRIAS AGROALIMENTARIAS

2.1. SECADORES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA: CLASIFICACIÓN.....	19
2.2. TIPOS DE SECADORES DIRECTOS O POR CONVECCIÓN	21
2.3. TIPOS DE SECADORES INDIRECTOS.....	36

2.1. SECADORES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA: CLASIFICACIÓN

La clasificación de los equipos de secado se puede hacer en base a:

- a. Las características y propiedades físicas del producto húmedo. Procedimiento apropiado para la selección de un grupo de secaderos para su estudio preliminar en un problema dado.
- b. El procedimiento para transmitir el calor al sólido húmedo. Más interesante industrialmente y revela diferencias en el diseño y funcionamiento de los secadores.

De acuerdo con este segundo criterio se distinguen los secadores directos, que utilizan gases calientes en contacto con el sólido húmedo para suministrar el calor y arrastrar el líquido vaporizado, los secadores indirectos en los que el calor se transmite al sólido húmedo a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado independientemente del medio calefactor, secadores dieléctricos y secadores por radiación.

2.1.1. Secadores directos o convectivos

Se caracterizan por utilizar gases calientes que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección fundamentalmente y que arrastran fuera del secador los vapores producidos.

Los gases calientes pueden ser:

- Aire calentado por vapor de agua
- Productos de la combustión
- Gases inertes
- Vapor recalentado
- Aire calentado por radiación solar

En este tipo de secadores el consumo de combustible es tanto mayor cuanto más bajo es el contenido de humedad residual del producto final.

Este tipo de secadores pueden ser continuos o intermitentes, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros y utilizándose los segundos para bajas capacidades de producción y para el tratamiento de productos que exigen manipulación especial. En el capítulo 3 se abordarán con más detalle este tipo de secadores.

2.1.2. Secadores por conducción o indirectos

Se caracterizan porque en ellos la transmisión de calor hasta el material húmedo tiene lugar por conducción a través de una pared, generalmente metálica.

La fuente de calor puede ser:

- Vapor que condensa.
- Agua caliente.
- Aceites térmicos.
- Gases de combustión.
- Resistencia eléctrica.

Los secadores indirectos permiten la recuperación del disolvente y son apropiados para la desecación a presiones reducidas y en atmósferas inertes, lo que les hace recomendables para deshidratar productos termolábiles o fácilmente oxidables, pudiendo utilizar métodos de agitación para asegurar una mejor transmisión de calor y eliminar los gradientes de humedad en el producto.

Al igual que los directos, pueden funcionar en régimen continuo o intermitente.

2.1.3. Secadores por radiación

Se basan en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. Esta energía se produce eléctricamente (infrarrojos) o por medio de refractarios únicamente calentados con gas. El costo de la energía necesaria para este método es de dos a cuatro veces mayor que el costo del combustible en los secadores descritos anteriormente.

2.1.4. Secadores dieléctricos

Se caracterizan por generar calor en el interior del propio sólido, en virtud de un campo eléctrico de alta frecuencia que provoca una gran agitación de las moléculas polares, cuya fricción genera el calor necesario para la evaporación. Puesto que el campo eléctrico es uniforme en todo el espesor del dieléctrico, el calentamiento es prácticamente uniforme y simultáneo en toda la masa del sólido, lo que lo hace interesante para la deshidratación de piezas de gran tamaño sin peligro de recalentamiento en la superficie.

Su campo de aplicación es todavía muy reducido debido a su alto costo de operación que puede ser diez veces superior al del combustible necesario en los secadores directos y al elevado costo del equipo auxiliar requerido para generar este tipo de energía.

2.2. TIPOS DE SECADORES DIRECTOS O POR CONVECCIÓN

Son en general aparatos sencillos y de fácil manejo. Los secadores por convección son los más utilizados en las industrias agrícolas y constan, en esencia, de las siguientes partes:

- RECINTO.
- SISTEMA DE CALEFACCIÓN: generalmente calorifugado, donde se realiza la evaporación.
- SISTEMA DE IMPUSIÓN DEL AIRE.

2.2.1. Secadores de horno o estufa

Es el más simple y consta de un pequeño recinto en forma paralelepípedica de dos pisos. El aire de secado se calienta en un quemador del piso inferior y atraviesa por convección natural o forzada el segundo piso perforado en el que se asienta el lecho de producto a secar.

Hoy día su utilización en la industria de alimentos es muy reducida, utilizándose para el secado de manzanas, lúpulo y forrajes verdes.

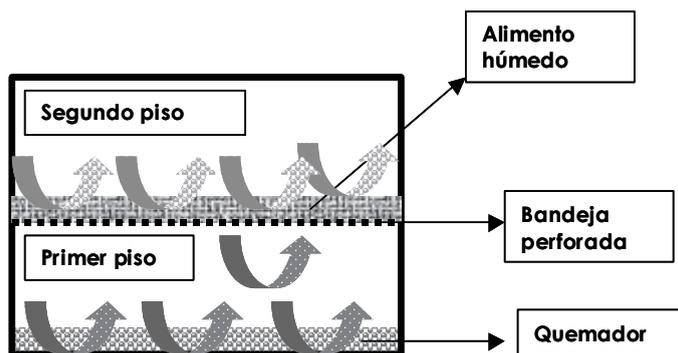


Figura 2.1. Esquema de un secador de horno o estufa

2.2.2. Secadores de bandejas o de armario

Normalmente funciona en régimen intermitente. Está formado por una cámara metálica rectangular que contiene unos soportes móviles sobre los que se apoyan los bastidores. Cada bastidor lleva un cierto número de bandejas poco profundas, montadas unas sobre otras con una separación conveniente que se cargan con el material a secar.

Se hace circular aire caliente entre las bandejas por medio del ventilador acoplado al motor haciéndole pasar previamente por el calentador constituido por un haz de tubos por cuyo interior circula normalmente vapor de agua. Los tabiques distribuyen uniformemente el aire sobre las pilas de bandejas.

Por medio del conducto de salida se evacua continuamente aire húmedo y a través de la abertura de entrada penetra aire fresco. Al final del ciclo de secado, normalmente largo, se saca de la cámara al conjunto de los bastidores para proceder a la descarga del producto seco y a una nueva carga.

Cuando las características del material y su manejo lo permiten, se utilizan bandejas perforadas en las que el aire circula a través de la capa de sólidos, con lo que se consigue aumentar la superficie de sólido expuesta a la acción del aire y disminuyendo consiguientemente la duración del ciclo de secado.

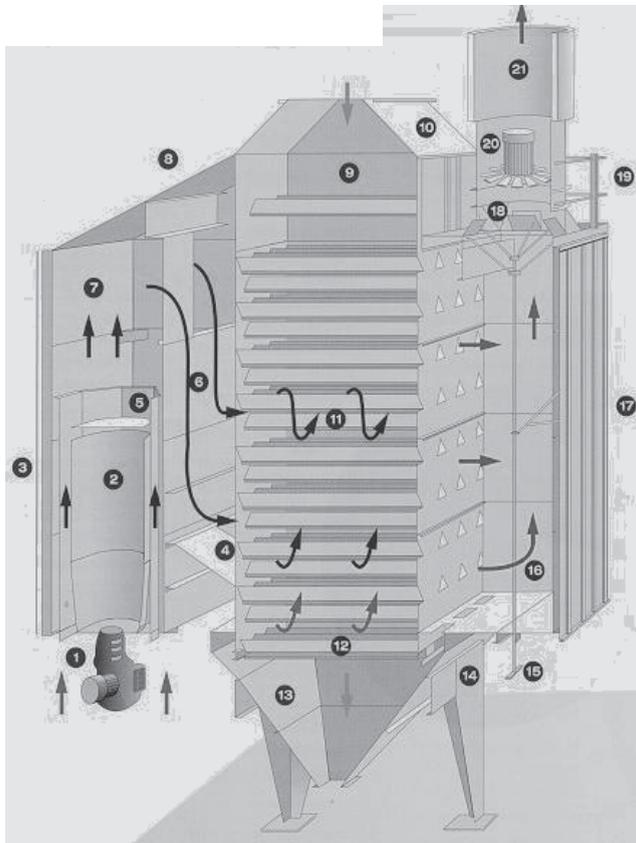


Figura 2.2. Secador de bandejas o armario

El secado de este equipo puede ser:

- De flujo horizontal, si el aire circula paralelamente al lecho a secar.
- De flujo transversal, si el aire circula perpendicularmente al lecho a secar.

Los rendimientos térmicos de este tipo de secador suelen estar comprendidos entre el 20 y el 50 %, pudiendo ser más bajos.

Los secadores de bandejas son útiles para secar pequeñas cargas de productos valiosos. En general se aplican cuando la capacidad necesaria no excede de 25 a 50 kg/h de producto seco.

En ellos se puede secar prácticamente cualquier material, pero a causa de la mano de obra requerida para la carga y descarga, su operación resulta costosa para su baja capacidad de producción. Sin embargo, su polivalencia y la buena calidad comercial de los productos obtenidos los hace utilizables en la deshidratación de productos agrícolas tales como la carlota, espinacas, ajo, perejil, guisantes, judías verdes, champiñones, cebollas, etc. Los secadores de bandejas pueden funcionar en régimen semicontinuo.

2.2.3. Secadores de túnel

Son semejantes a los secadores de bandejas pero de funcionamiento semicontinuo, para lo cual las bandejas conteniendo el producto a secar se cargan sobre carretillas que se trasladan a lo largo del túnel de secado.

Quando se introduce una nueva carretilla, la primera es evacuada conteniendo el producto seco, mientras las restantes adelantan una posición en su trayectoria.

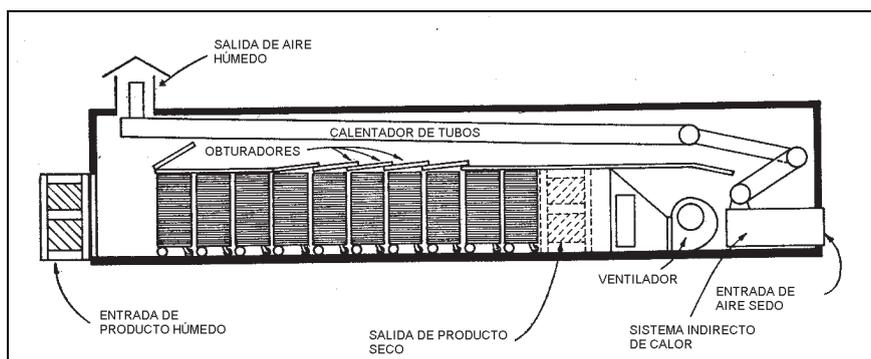


Figura 2.3. Secador de túnel

Para seguir leyendo haga click aquí