

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Departamento de Ingeniería Química



SECADO DEL ORUJO EN LECHO FLUIDIZADO - MÓVIL

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

José Santiago Torrecilla Velasco

Bajo la dirección de los doctores

José Manuel Aragón Romero

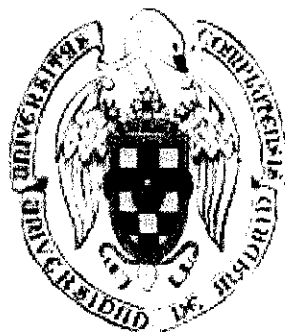
María del Carmen Palancar Montero

Madrid, 2000

ISBN: 84-669-2453-1

724619

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS
Departamento de Ingeniería Química



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE



5314061475

SECADO DEL ORUJO EN LECHO FLUIDIZADO/MÓVIL

MEMORIA
Que para optar al
Grado de Doctor en Ciencias Químicas
Presenta:

JOSÉ SANTIAGO TORRECILLA VELASCO



Madrid, 2000

José Manuel Aragón Romero y M^a Carmen Palancar Montero, profesores Titulares del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid.

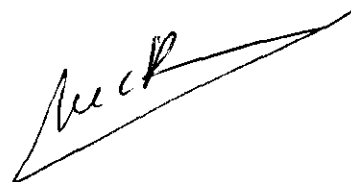
Informan que:

El presente trabajo de investigación, titulado "*Secado del orujo en lecho fluidizado/móvil*", constituye la memoria que presenta el Licenciado D. José Santiago Torrecilla Velasco, con un contenido, duración y extensión que consideran satisfacen los requisitos necesarios como Tesis Doctoral.

Y para que conste firman el presente informe en Madrid, a 17 de diciembre de 1999.



Jose Manuel Aragón Romero



M^a del Carmen Palancar Montero

AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido realizado con ayuda económica de la Comisión Europea, programa específico RTD de Agricultura y Pesca (FAIR), contrato número CT96-1420, proyecto “*Improvements of Treatments and Validation of the Liquid-Solid Waste from the Two-Phases Olive Oil Extraction (“IMPROLIVE”)*” y de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (ref. AMB97-1293-CE). El soporte otorgado no refleja necesariamente la opinión o punto de vista de la CE ni presupone futuras políticas de la Comisión en esta área. Dicho trabajo ha sido realizado en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los Profesores Titulares de dicho Departamento, Dr. José Manuel Aragón Romero y Dra. M^a Carmen Palancar Montero, por la ayuda que recibí de ellos, sin la que no hubiera sido posible la realización de esta obra.

Asimismo quiero mostrar mi agradecimiento a D. Antonio Artacho, D. Miguel Manaute y al Dr. Cristino Lobillo en los que encontré una ayuda inestimable para el conocimiento del maravilloso mundo del aceite.

Deseo dar las gracias a Dios por tener la gracia de conocerle, hacerse real en mi vida y por permitirme crecer con unos padres rectos y pacientes. Agradezco a Irene, Santiago y Esther su apoyo en todo momento.

*Y la paloma volvió a él a la hora de la tarde;
y he aquí que traía una hoja de olivo en el pico;
y entendió Noé que las aguas se habían retirado
de sobre la tierra.*

Génesis 8: 11

Eben-Ezer

ÍNDICE



INDICE

	<u>Pág.</u>
<u>RESUMEN</u>	14
<u>1.- INTRODUCCIÓN</u>	20
1.1.- ASPECTOS GENERALES DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE	20
<i>1.1.1.- Lavado</i>	21
<i>1.1.2.- Molienda y batido</i>	21
<i>1.1.3.- Extracción física</i>	23
<i>1.1.4.- Sistema de dos fases</i>	24
<i>1.1.5.- Orujo de dos fases</i>	27
1.2.- ASPECTOS GENERALES DEL SECADO	32
<i>1.2.1.- Teoría del secado</i>	32
1.2.1.1.- Estática del secado	33
1.2.1.2.- Cinética del secado	35
1.2.1.2.1.- Períodos de secado	35
1.2.1.2.2.- Mecanismo de secado	38
1.2.1.2.3.- Condiciones óptimas de secado	39
1.2.1.3.- Secado de productos heterogéneos	40
1.2.1.3.1.- Movimiento de solutos	40



1.2.1.3.2.- Retracción	41
1.2.1.3.3.- Endurecimiento superficial	41
1.2.1.4.- Secado de productos agrícolas	42
<i>1.2.2.- Equipos de secado</i>	42
1.2.2.1.- Secaderos rotatorios	44
1.2.2.2.- Secaderos neumáticos	46
1.2.2.3.- Secaderos de lecho fluidizado	48
1.3.- LECHOS MÓVILES Y FLUIDIZADOS	51
<i>1.3.1.- Aspectos generales de los lechos móviles</i>	52
<i>1.3.2.- Aspectos generales de la fluidización</i>	53
<i>1.3.3.- Fluidodinámica de lechos fluidizados</i>	54
1.3.3.1.- Análisis cualitativo de la fluidización	54
1.3.3.2.- Porosidades de lecho	58
1.3.3.3.- Pérdidas de carga	59
1.3.3.4.- Velocidades de fluidización	61
1.3.3.5.- Distribución de tamaños y segregación	61
1.3.3.6.- Tiempos de residencia	62
1.3.3.7.- Parámetros que definen al lecho fluidizado	64
<i>1.3.4.- Lecho fluidizado/móvil</i>	66
<i>1.3.5.- Modelos de secadero de lecho fluidizado</i>	68



1.4.- ASPECTOS GENERALES DE LAS REDES NEURONALES	71
<i>1.4.1.- Redes neuronales naturales</i>	71
<i>1.4.2.- Redes neuronales artificiales</i>	73
1.4.2.1.-Perceptron multicapa	77
1.4.2.1.1.-Elaboración de la información	80
1.4.2.1.2.-Optimación de la red	84
1.4.2.1.3.-Proceso de aprendizaje de la Red	86
1.5.-OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	91
<i>1.5.1.- Objetivos</i>	91
<i>1.5.2.- Plan de trabajo</i>	92
2.- <u>DESCRIPCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPO</u> <u>EXPERIMENTAL</u>	95
2.1.-TERMINOLOGÍA EMPLEADA	95
2.2.-DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	97
<i>2.2.1.- Composición del orujo</i>	99
<i>2.2.2.- Propiedades físicas del orujo de interés en el secado</i>	100
2.3.-DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL	102
<i>2.3.1.- Sistema de circulación de gases</i>	102
<i>2.3.2.- Sistemas de circulación de sólidos</i>	103



2.3.3.- Contactor/Secadero	106
2.3.4.- Sistemas de calefacción	108
2.3.5.- Sistemas de medida	108
2.3.6.- Sistemas de control	118
2.4.-DESCRIPCIÓN DE UN EXPERIMENTO	122
2.4.1.- Preparación del material a secar	122
2.4.2.- Puesta en marcha del sistema y desarrollo de un experimento	122
3.- <u>ESTUDIO FLUIDODINÁMICO</u>	126
3.1.- FLUIDODINÁMICA DEL PRODUCTO	126
3.1.1.- Caracterización del Sólido	126
3.1.2.- Pérdida de carga del secadero de lecho fluidizado/móvil	130
3.2.- VELOCIDADES DE FLUIDIZACIÓN Y POROSIDAD DEL LECHO	134
3.3.- PORCENTAJE DE MEZCLA	137
3.4.- SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE SÓLIDO	144



4.- ESTUDIO DEL SECADO DE ORUJO	149
4.1.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO	149
4.2.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD CRÍTICA	152
4.3.- INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN Y TIPO DE CONTACTO	155
4.3.1.- <i>Secado en bandeja a temperatura ambiente</i>	156
4.3.2.- <i>Secado en lecho fijo</i>	159
4.3.3.- <i>Secado en lecho fluidizado</i>	160
4.3.3.1.- Influencia de la temperatura	162
4.3.3.2.- Influencia del caudal de aire de fluidización	164
4.3.4.- <i>Secado en lecho móvil</i>	167
4.3.5.- <i>Secado en lecho fluidizado/móvil</i>	171
4.4.- MODELIZACIÓN	177
4.4.1.- <i>Cinética de secado</i>	177
4.4.1.1.- Período de inducción	177
4.4.1.2.- Período de velocidad de secado constante	179
4.4.1.3.- Período de velocidad de secado decreciente	183
4.4.2.- <i>Redes neuronales aplicadas a la modelización</i>	184
4.4.2.1.- Proceso de aprendizaje	184
4.4.2.2.- Proceso de verificación del aprendizaje	188
4.4.2.3.- Modelización del proceso de secado mediante redes neuronales	191



5.- <u>EXTENSIONES Y APLICACIONES AL DISEÑO INDUSTRIAL</u>	194
5.1.- CONTROL DE LA OPERACIÓN DE SECADO	194
5.2.- GASTO ENERGÉTICO DE LA OPERACIÓN GLOBAL DE SECADO	199
5.2.1.- <i>Gasto energético en el secadero</i>	199
5.2.2.- <i>Capacidad de evaporación del secadero</i>	201
5.3.- CALIDAD DEL ORUJO TRATADO	203
6.- <u>CONCLUSIONES</u>	209
7.- <u>NOMENCLATURA</u>	214
8.- <u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	218
9.- <u>APÉNDICE</u>	225

RESUMEN



RESUMEN

Uno de los mayores productores de aceite de oliva en el mundo es España. Hay aproximadamente una superficie olivarera total que supone el 10% de la superficie agrícola nacional y el 25% de la superficie olivarera mundial. Las principales utilidades de la aceituna son: la producción de aceite de oliva (92%) y la producción de aceituna de mesa (8%).

La calidad y cantidad de aceituna recogida depende fundamentalmente de factores climatológicos. En términos medios la producción asciende aproximadamente a 3.450.000 t/a. La mayor parte se moltura para la producción de aceite de oliva virgen, mediante el proceso de dos fases. Este sistema produce un subproducto llamado orujo de dos fases o alpeorujo. Actualmente, en España se generan alrededor de 2.600.000 t/a de orujo. Dados los problemas medioambientales, económicos y sociales que ocasiona esta gran cantidad de subproducto generado, es necesario establecer vías de aprovechamiento. Con este objetivo, la Unión Europea y otras entidades públicas y privadas nacionales y europeas están subvencionando líneas de investigación. El desarrollo de la investigación expuesta en esta memoria esta encuadrada dentro del desarrollo de un proyecto subvencionado por la Comisión Europea y la CICYT, denominado: *“Improvements of treatments and validation of the liquid-solid waste from the two-phase olive oil extraction, (IMPROLIVE)”*. Este proyecto surgió para proporcionar una información y experiencia sobre los usos más adecuados del orujo de dos fases en cada caso, a pequeña y gran escala, reduciendo el impacto medioambiental que éste lleve consigo desde los puntos de vista del producto tratado y del proceso seleccionado. Además de todo ello, es necesario crear nuevos mercados de los productos generados o analizar los ya existentes para su introducción en ellos.

Una de las propiedades físicas que dificultan las distintas líneas de tratamiento del orujo de dos fases es su elevada humedad, que puede ser de hasta el 65%, con lo que el tratamiento previo a cualquier otra operación (transporte, extracción, compostaje, etc.) es siempre la operación de secado.

Actualmente, en el sector extractor del aceite de orujo, el problema es encontrar un sistema de secado de orujo con un rendimiento energético adecuado con el fin de hacer rentable la producción de dicho aceite. El sistema de secado más comúnmente utilizado es el secadero rotatorio. Los secaderos rotatorios presentan un rendimiento energético por debajo del 50%. Dichos



secaderos han sido utilizados tradicionalmente para el secado del orujo producido por el sistema de tres fases, donde el sólido a tratar presenta una humedad por debajo del 50%. Estos secaderos presentan diversos inconvenientes para secar el orujo de dos fases entre los que destacan: problemas de alimentación, aglomeración de sólidos y caramelización problemas debidos fundamentalmente al alto contenido en agua y polisacáridos que contiene el orujo.

Los lechos fluidizados han sido y son utilizados para el secado industrial de muy diversos productos. El sólido de un lecho fluidizado está prácticamente suspendido en el fluido ascendente y el contacto sólido-gas es muy adecuado para operaciones de transferencia tanto de materia como de calor. El sólido a secar debe presentar unas características granulométricas y fluidodinámicas adecuadas para llevar a cabo la operación en lecho fluidizado. Por otro lado, el tratamiento de sólidos en lecho fluidizado produce una gran cantidad de partículas de pequeño diámetro, por ello los lechos fluidizados a escala industrial requieren grandes sistemas de separación de finos, tales como ciclones y filtros, equipos que prácticamente duplican el espacio necesario para el secadero. Una de las partes más innovativas de la presente investigación es la utilización de un lecho móvil situado encima del lecho fluidizado que, entre otras ventajas, actúa de sistema recolector de estos finos, con lo que se elimina la necesidad de ciclones o filtros.

El objetivo general de la presente investigación es la validación y posterior optimización de un secadero basado en la combinación de dos tipos diferentes de contactores como son el lecho fluidizado y el móvil. Dicho objetivo general puede ser estructurado como se muestra a continuación:

- Estudio de la capacidad del secadero para realizar la operación de secado, dentro de unos márgenes tanto económicos como de calidad del sólido seco adecuados.
- Estudio pormenorizado de las variables que afectan a la operación de secado en lecho fluidizado/móvil (temperatura, humedad, caudales de aire y sólido, etc.), para posteriormente fijar un adecuado intervalo de condiciones de operación.
- Estudio comparativo del secadero objeto de la investigación con otros secaderos utilizados industrialmente. Dicha comparación se realizará desde distintos puntos de vista y teniendo en cuenta la rentabilidad económica, calidad del sólido seco y de los subproductos generados a partir de dicho sólido (principalmente aceite de orujo).



Para el desarrollo de los objetivos anteriormente mencionados se ha establecido una metodología de trabajo experimental consistente en:

1. Análisis físico-químico del orujo a tratar.
2. Acondicionamiento del sólido a secar para mejorar sus características fluidodinámicas (mezcla de orujo fresco con orujo seco).
3. Modelización del proceso de secado del orujo en lecho fluidizado mediante algoritmos basados en Redes Neuronales Artificiales.
4. Estudio de cada uno de los sistemas de contacto por separado (lechos fluidizado y móvil) para realizar un estudio de cinética de secado del sólido en lecho fluidizado.
5. Validación y optimación del sistema combinado de lecho fluidizado/móvil y selección de las condiciones de operación para el funcionamiento conjunto controlado de ambos lechos.

Se ha diseñado, construido y puesto a punto una instalación de secado de orujo en continuo. El secadero consiste en un cilindro de acero suave con un ensanchamiento en su parte superior. La parte inferior del cilindro aloja el lecho fluidizado y la parte superior el móvil, entre ambos se encuentra un espacio vacío. El sólido que sale del lecho móvil es la alimentación al lecho fluidizado. La capacidad de tratamiento de la instalación es de 5 kg/h. Uno de los mayores problemas que se ha presentado es conseguir alimentar el sólido húmedo de forma homogénea y con el caudal deseado. El problema se resolvió alimentando una mezcla de orujo húmedo y orujo seco y utilizando un sistema de alimentación tipo neumático, diseñado especialmente para este fin. La proporción de mezcla óptima está comprendida entre el 70 y el 80 % de orujo húmedo. Ésta se ha seleccionado como un compromiso entre la mejora que proporciona la mezcla en la manejabilidad y en las propiedades fluidodinámicas del sólido y el gasto energético requerido en la operación de mezclado y la energía que hay que aportar para calentar el sólido seco. El sistema de alimentación es un sistema neumático, que origina pequeñas sobrepresiones en la bóveda que se forma en la parte inferior del lecho móvil. La sobrepresión provoca la ruptura de la bóveda y el sólido cae desde el lecho móvil al lecho fluidizado. Regulando la frecuencia con la que se origina la sobrepresión y su duración se puede regular el caudal de sólido alimentado al lecho fluidizado.

Se han determinado experimentalmente la humedad de equilibrio del orujo para diferentes humedades relativas del aire y la humedad crítica de dicho sólido. Para el intervalo de humedades



relativas del aire en el ambiente de trabajo (35-40%) la humedad de equilibrio del orujo está comprendida en el intervalo del 4-8%, la humedad crítica depende de la temperatura de operación, humedad inicial del orujo y geometría del lecho.

El secado del orujo se ha llevado a cabo con temperaturas de operación comprendidas entre 60 y 125°C y en distintos contactores, calculando en cada uno de ellos las velocidades de secado en el período de velocidad constante. En el secado en bandejas con convección natural la velocidad media fue de 0.34 h⁻¹. En lecho fijo, a temperatura ambiente, la velocidad de secado media fue de 0.48 h⁻¹, la velocidad media asciende a 34 h⁻¹ cuando la temperatura media de operación es de 60°C en el mismo contactor. En un lecho fluidizado la velocidad media de secado oscila entre 64 h⁻¹ y 128 h⁻¹ en función de la temperatura de operación (75-125°C). La velocidad de secado media en un lecho fluidizado/móvil, con una temperatura de operación de 125°C, es de 700 h⁻¹.

Se ha calculado la cinética de secado del orujo en lecho fluidizado. Con ella se ha comprobado que la operación de secado del orujo depende fundamentalmente de la temperatura de operación, mostrando una dependencia menor con el caudal másico de aire alimentado y la humedad del sólido.

Modelizar de una forma matemática un sistema de secado de orujo es extremadamente complejo debido al alto número de variables que afectan al proceso. Debido a ello, en la presente investigación se han utilizado Redes Neuronales Artificiales para modelizar el secado del orujo de dos fases. Estas redes se adaptan al proceso a modelizar mediante un proceso previo de aprendizaje iterativo, de esta forma y después de un período de optimación de la red, ésta es capaz de predecir la evolución de la humedad a lo largo de un proceso de secado. La red neuronal que se ha elaborado para modelizar el secado es un perceptron de tres capas, cuya topología es 3 neuronas de entrada, 4 intermedias y una única neurona de salida. A la capa de entrada se le introducen valores de temperaturas de entrada del aire y del lecho fluidizado y de la humedad del sólido a la salida a tiempo t , la capa de salida genera datos a tiempo $t+1$ de humedad del sólido a la salida del secadero.

El objetivo fundamental en todas las optimaciones de las variables propias del secadero es la minimización del gasto energético y el incremento de la calidad final del orujo seco. Un aumento del rendimiento energético y económico del proceso rentabiliza todas las utilidades posteriores a la operación de secado. En esta línea, y para minimizar el consumo energético del proceso, se han



ensayado temperaturas de secado relativamente bajas (60-70°C), mejorando de esta forma la calidad del orujo seco producido con vistas a las operaciones posteriores.

El consumo energético dentro de la operación de secado del orujo es un aspecto relevante, ya que repercute directamente en la rentabilidad que se desprende de la comercialización del aceite de orujo y de todos los subproductos derivados del mismo, y dado los estrechos márgenes con los que juega este mercado, es necesario que dichos gastos se reduzcan lo máximo posible. En el secadero objeto de la investigación, según como se mostrará a lo largo de la memoria, se han utilizado temperaturas de trabajo, que en comparación con las temperaturas de secado habituales utilizadas industrialmente dentro del sector (300-400°C), son bajas. Esto se traduce en un menor consumo energético. Dentro del secado en lecho fluidizado/móvil se han realizado estudios sobre el rendimiento energético, capacidad de evaporación y composición química del orujo secado en dicho secadero desde el punto de vista del aceite de orujo extractado. El consumo energético medio en el secadero propuesto es de 1.2 kW-h/kg_{agua}, industrialmente el consumo energético se encuentra comprendido entre 1.39 y 1.63 kW-h/kg_{agua}. La capacidad de evaporación media del secadero es de 62 kg/(h·m³). La calidad del aceite de orujo producido es semejante, en cuanto a su composición, al producido actualmente en las extractoras de orujo con hexano a escala industrial, con lo que el rendimiento económico del proceso aumenta.

Por ello, basándose en la información y experiencia recabada, dicho orujo puede ser secado desde humedades próximas al 70% en base húmeda a la humedad de equilibrio (4-8%) en un secadero fluidizado/móvil, con un consumo energético inferior al consumo medio en distintas instalaciones de secado de orujo. Además, cabe destacar que, debido a la configuración del secadero, se reduce notablemente el espacio físico requerido dentro de la instalación industrial, para la realización de la operación de secado.

1.- INTRODUCCIÓN



1.- INTRODUCCIÓN

El sector del aceite de oliva reviste una importancia notable tanto en el ámbito nacional como internacional. Desde su introducción en la Península Ibérica, probablemente por parte de los romanos y árabes alrededor del siglo VI a. de C. (Kiritsakis, 1992), el olivo está considerado como símbolo de paz, felicidad y de la cultura mediterránea, además de producir aceite de oliva. El origen de esta planta se encuentra bien arraigado en el vocabulario oleícola español: Del vocablo griego *elaia* deriva la palabra latina *olea* y *olivum* (olivo); de la palabra hebrea *zait* viene la palabra árabe *az-zait* y *zaitum* que posteriormente han dado lugar al nombre español de aceite y aceituna (Tardáguila et al, 1996).

1.1.- ASPECTOS GENERALES DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE

El proceso productivo del aceite de oliva virgen comprende varias etapas bien diferenciadas: crecimiento y recolección de la oliva, transporte a la almazara, recepción, lavado y almacenamiento del fruto, preparación de la pasta, separación de las fases y almacenamiento del aceite generado. Cada una de estas partes puede ser objeto de un tratamiento profundo, pero en el caso presente es innecesario para la correcta comprensión del desarrollo de la investigación realizada. Por ello se tratarán sólo las etapas comprendidas entre el lavado de la oliva y la producción del aceite, operaciones unitarias que tienen una influencia notable en el tipo y propiedades del orujo, subproducto generado en el proceso.

Las olivas de una campaña, como regla general, son recolectadas entre finales de un año e inicios del siguiente. La oliva debe ser recogida en su punto adecuado de madurez para que la calidad del aceite y el rendimiento económico del proceso de molturación sean óptimos (Humanes y Civantos, 1992). El fruto, una vez recogido, es transportado a las almazaras, donde será extraído su zumo, el aceite de oliva.

Las aceitunas, una vez dentro de la almazara, sufren distintas operaciones básicas, usuales en otras industrias relacionadas con el sector agroalimentario. Siguiendo el orden de operación, se describen las distintas etapas que tienen lugar (Espinola, 1996).



1.1.1.-Lavado

Una de las operaciones básicas para la obtención de aceites de calidad es la limpieza y lavado del fruto. Tradicionalmente el agricultor ha limpiado el fruto en el campo, mediante el uso de cribas que separan las impurezas más groseras como son las ramas, hojas, etc. El gran problema es que esta operación así realizada presenta un elevado coste y además produce una aceituna excesivamente sucia, con una cantidad de impurezas del orden del 5 al 15% en peso. Como en la totalidad de las operaciones de lavado, el tipo de impurezas condiciona el proceso de limpieza. En el caso de la aceituna, las impurezas se pueden clasificar en (Hermoso et al, 1991):

Hojas y ramas: Su eliminación se realiza mediante una corriente de aire que incide transversalmente en el momento en el que las olivas sucias caen sobre un tamiz vibrante. Dicho tamiz elimina la arena que pueda estar suelta y que eventualmente puede acompañar al fruto. Estos limpiadores, dependiendo de la cantidad de impurezas que presenten las aceitunas, son capaces de tratar del orden de 30 a 40 t/h. Una imperfecta eliminación de estas impurezas proporciona al aceite una coloración verde, además de aromas que desvirtúan el aceite producido.

Tierra y polvo: La eliminación de estas impurezas se realiza mediante el lavado con una corriente de agua. La diferencia de densidad que presenta la impureza y el fruto es el fundamento físico en el que se basa esta limpieza de la oliva. Habitualmente, el agua circula en contracorriente con la aceituna a lavar. Los limpiadores, dependiendo de las impurezas presentes, son capaces de tratar del orden de 20 t/h. El paso de estas impurezas al proceso de molturación produce un desgaste excesivo de las máquinas, aumenta la velocidad de fermentación de la pasta y enturbian el aceite producido.

1.1.2.- Molienda y batido

Dado que el aceite se encuentra retenido en las vacuolas de las olivas, es necesario romperlas y extraerlo de éstas, para ello se realiza la etapa de molienda y de batido (Hermoso et al, 1991 y Espinola, 1996).



Molienda: Actualmente, la molienda se realiza mediante molinos mecánicos. Dichos molinos son de martillos con cribas de distintos diámetros, del orden de 4-8 mm. El diámetro seleccionado controla el grado de molienda y éste depende fundamentalmente del tipo de aceituna tratada y del estado y grado de madurez de ésta. El fruto molido es forzado a pasar a través de las perforaciones de la criba por acción de los martillos.

Batido: Mediante la operación de batido, posterior a la rotura de las vacuolas mediante la molienda, se pretende unir las gotitas de aceite contenido en ellas para formar una fase oleosa separable que posteriormente constituirá el aceite. Las batidoras más utilizadas en el sector oleícola están compuestas por depósitos de capacidad para 2 a 3 t. y con unas paletas que giran de 15 a 18 r.p.m.. La misión fundamental de estas paletas es voltear la masa y generar un efecto cizalla.

En la tabla 1.1 se muestran algunas características representativas de una pasta de aceituna, obtenida en la etapa de molienda/batido. La variedad de la aceituna es Picual, de la campaña 1998-99, recolectada en enero de 1999.

Tabla 1.1.- Características de la pasta de aceituna

PASTA DE ACEITUNA VARIEDAD PICUAL	
<i>Humedad (%bh)</i>	54
<i>Materia Grasa (Método RMN)</i>	16.4
<i>Acidez (%)</i>	0.6
<i>Índice de Peroxidos (meq O₂/kg)</i>	9.2
<i>K₂₇₀</i>	0.1
<i>K₂₃₂</i>	1.43
<i>ΔK</i>	0

Como se puede observar en la tabla 1.1, la pasta presenta un alto contenido de materia grasa, típico de una pasta preparada para la extracción física de su materia grasa, la acidez es la que presenta el aceite extraído mediante extracción Soxhlet y al que posteriormente se ha sometido a una valoración ácido-base. En el caso expuesto esta acidez es baja. Los coeficientes de extinción K_{270} , K_{232} y ΔK son coeficientes utilizados para comprobar el grado de oxidación del aceite (Diario Oficial CEE, 1991). El coeficiente K_{270} , en función del tipo de aceite de que se trate, suele oscilar entre valores próximos a 0, en el caso de aceite de oliva virgen, y valores no superiores a 2 en aceite de orujo de oliva. El coeficiente K_{232} se encuentra comprendido entre valores próximos a 0 en



el caso de aceite de oliva virgen y por debajo de 5.3 en el caso de aceite de orujo de oliva, el coeficiente ΔK se encuentra comprendido entre valores próximos a 0 en el caso de aceite de oliva virgen y por debajo de 0.2 para aceite de orujo de oliva. En base a esto, el grado de oxidación del aceite contenido en la pasta de aceituna cuya analítica se muestra en la tabla 1.1 es relativamente bajo.

1.1.3.-Extracción Física

Después de la molienda y el batido se lleva a cabo la extracción física del aceite contenido en las vacuolas que es separado de la fase sólida. La extracción del aceite de oliva en España, desde un punto de vista histórico, se ha realizado por cuatro métodos diferentes (Espinola, 1996) que se describen a continuación. Se clasifican en dos grandes grupos según usen presión o centrifugación.

Sistema clásico: está basado en la presión; la pasta procedente de las aceitunas molidas y batidas se reparte en capachos y es sometida a presión en prensas hidráulicas (Hermoso et al, 1991).

Sistema de dos fases antiguo: En un principio, los decantadores centrífugos estaban dotados de dos salidas, una para la fracción más rica en aceite y otra fracción residual de orujo muy húmedo. Este hecho implicaba un gran problema en la separación de los componentes de las diversas fracciones, por ejemplo era difícil la rotura y separación de la emulsión aceite/agua de vegetación (Alba, 1994 a y Espinola, 1996).

Sistemas de tres fases: A partir de 1970, la pasta molida y batida se empezó a centrifugar en decantadores centrífugos horizontales en los que se obtenían tres fases: una sólida (orujo de tres fases), una acuosa denominada alpechín (Martínez et al, 1994 a y b) (constituido por agua de vegetación y agua de proceso) y otra oleosa constituida mayoritariamente por aceite. Estos sistemas denominados de tres fases, Figura 1.1, sin alterar la calidad del aceite de oliva, presentan la ventaja de operar en continuo, con completa automatización y por tanto pequeña necesidad de mano de obra, aunque tienen el inconveniente de un mayor consumo de agua y la producción de alpechines, que duplican el volumen de subproducto producido por el sistema de prensas.



Sistemas de dos fases: En 1991, algunos investigadores y casas comerciales desarrollaron un proceso de centrifugación mejorado en el que sólo se obtienen dos fases, una oleosa compuesta fundamentalmente por aceite y otra sólida que contiene el orujo y el agua de vegetación. Este nuevo orujo se denomina actualmente orujo de dos fases o alpeorujo. Las diferencias básicas entre los procesos de dos y tres fases se pueden apreciar en los esquemas de la Figura 1.1.

1.1.4.-Sistema de dos fases

Dado que el sistema de elaboración de dos fases es el más extendido actualmente en España y que además el subproducto que se genera es el producto objeto de secado en el presente trabajo, dicho método productivo de aceite de oliva y el subproducto generado se tratará más pormenorizadamente.

En la campaña de 1991-92 se introdujo en España el nuevo sistema de decantadores de dos fases, Figura 1.1. (Alba et al., 1992, Alba et al., 1993). Esta tecnología extractiva presenta la ventaja del notable ahorro hídrico y energético. Además, la calidad del aceite proveniente del sistema de dos fases es superior a la calidad de los aceites obtenidos por otros métodos. Presentan un contenido en polifenoles mayor que el aceite del sistema de tres fases (Alba et al. 1992; Uceda et al 1995 a y b), como se muestra en la tabla 1.2. Esto implica que el aceite extraído con el nuevo sistema tiene una mayor capacidad antioxidante debido a que estas sustancias fenólicas protegen al aceite del ataque del oxígeno del aire, impidiendo así el enranciamiento con el tiempo, consecuentemente dicho contenido en polifenoles aumenta la estabilidad del aceite. La presencia de polifenoles reduce además el estrés oxidativo biológico, teniendo así, a nivel terapéutico un importante papel en la prevención de las enfermedades cardiovasculares y del cáncer como ha sido reconocido por la comunidad médica mundial (Keys, 1970; Esterbauer, 1988; Mataix, 1994). Las sustancias fenólicas tienen también una influencia notable sobre las características organolépticas (Solinas, 1990). De hecho el aceite producido a partir del sistema de dos fases posee las notas de frutado, amargo y picante notablemente acentuadas respecto al sistema de tres fases (Uceda et al, 1995 a y b).

En la tabla 1.2. se muestran dos analíticas que caracterizan la calidad de los aceites obtenidos mediante los procesos de dos y tres fases (Hermoso, 1993).

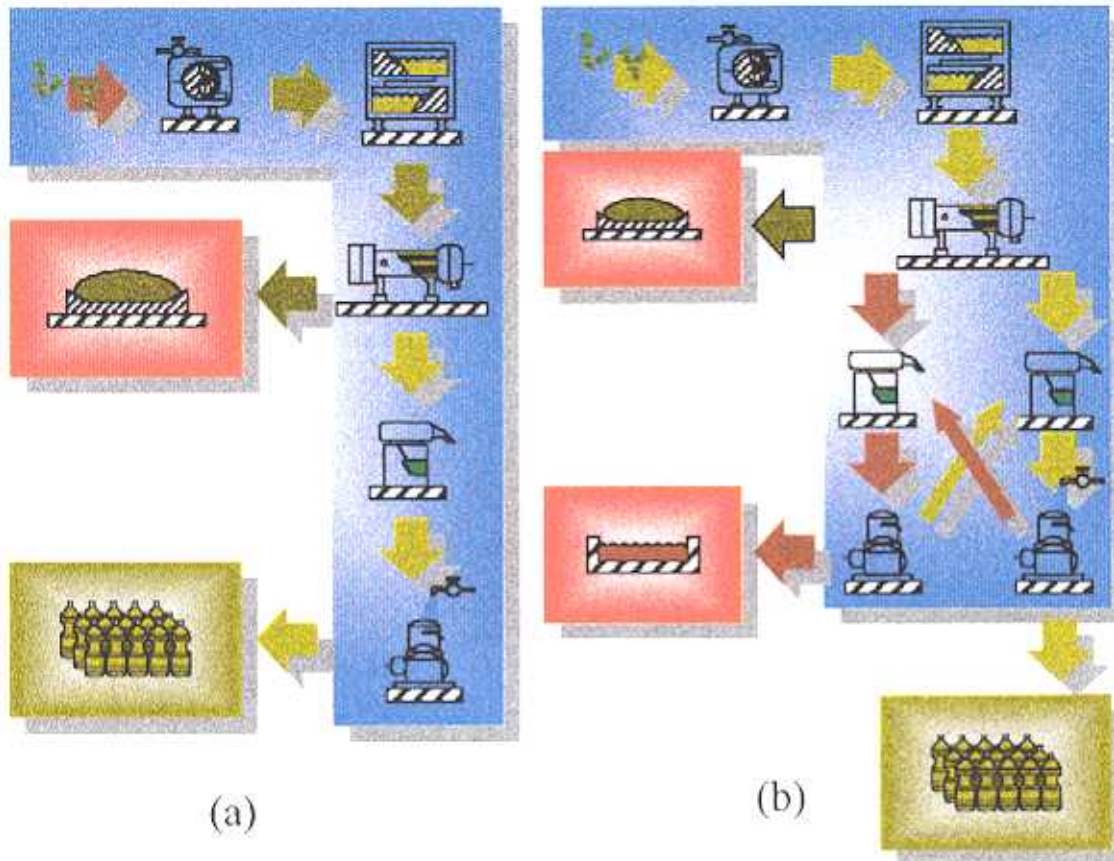


Tabla 1.2.-Características e índices fisicoquímicos de aceites producidos por el proceso de dos y tres fases

ÍNDICE	DOS FASES	TRES FASES
Índices fisicoquímicos		
<i>Grado de Acidez (°)</i>	0.29	0.39
<i>Peróxidos (meq O₂/kg)</i>	9.39	8.62
<i>K₂₇₀</i>	0.1	0.09
<i>K₂₃₂</i>	1.35	1.42
<i>K₂₂₅</i>	0.19	0.13
<i>Polifenoles (ppm)</i>	202	132
<i>Estabilidad (h.)</i>	61.25	46.73
<i>Humedad (%)</i>	0.16	0.17
<i>Impurezas (%)</i>	0.01	0.01
Características de los aceites		
<i>pH</i>	5.5	6.5
<i>Sólidos Totales (g/kg).</i>	10.3	5.6
<i>Sólidos totales minerales (g/kg).</i>	2.9	0.7
<i>Sólidos totales volátiles (g/kg).</i>	7.4	4.9
<i>Sólidos en suspensión (g/kg).</i>	6.2	4.1
<i>Sólidos minerales en suspensión (g/kg).</i>	1.1	0.4
<i>Sólidos volátiles en suspensión (g/kg).</i>	5.1	3.7

En cuanto al rendimiento industrial, los decantadores de dos fases realizan la separación en las distintas fases mediante la fuerza centrífuga suministrada a la pasta de aceituna mediante el giro de dicha pasta a una velocidad comprendida entre 3000 y 5000 r.p.m (Uceda et al, 1995). Desde un punto de vista económico, los costes de producción del aceite de oliva virgen son inferiores para un sistema continuo de dos fases, un 18% de media. A esto habría que añadir las ventajas del escaso consumo de agua y la ausencia de alpechín (Amirante et al., 1993) dentro del ciclo productivo.

En conclusión, el sistema de dos fases no plantea problemas de calidad en lo que al aceite se refiere y elimina el problema de los alpechines. Sin embargo el proceso de dos fases genera un orujo con una serie de problemas que se manifiestan en el almacenamiento, transporte y secado, aspecto éste último objeto de la presente investigación. No obstante, aún con la desventaja en el uso y el manejo del orujo producido, el sistema de dos fases se ha difundido notablemente por toda la geografía española en las últimas campañas sobre todo a causa de la ausencia o escasa producción de alpechín. Por ello, la generación de orujo de dos fases también está aumentando.



	MOLINO		BATIDORA
	DECANTADOR		VIBROFILTRO
	CENTRIFUGA		ORUJO
	ACEITE DE OLIVA VIRGEN		AGUA
	ALPECHÍN		

Figura 1.1.- Sistemas centrifugos de extracción del aceite de oliva virgen: (a) Dos fases; (b) Tres fases.



Limpieza del aceite producido por los decantadores de dos fases: La separación que se lleva a cabo mediante los decantadores centrífugos horizontales no es suficientemente adecuada, por lo que es necesario un lavado y separación posterior de la fase oleosa. Actualmente, este proceso de limpiado del aceite se realiza mediante centrífugas verticales autolimpiables (Hermoso et al, 1991). Para ello se utiliza la acción de la fuerza centrífuga que es imprimida al líquido mediante giros a una velocidad de 6000 a 7000 r.p.m., proporcionando al aceite unas mejores características organolépticas y de estabilidad. Dentro del proceso de limpiado del aceite se producen también dos fases una fase acuosa y otra oleosa. La fase oleosa es denominada aceite de oliva virgen que, mediante las analíticas adecuadas, se designará como aceite de oliva virgen extra, aceite de oliva virgen, aceite de oliva virgen corriente o aceite de oliva virgen lampante.

1.1.5.- Orujo de dos fases

Hasta hace aproximadamente 10 años en España se generaba exclusivamente un orujo que era mayoritariamente de tres fases, que presenta una humedad del orden del 50-55%. La aparición del sistema de dos fases pone en escena otro subproducto llamado orujo de dos fases o alpeorujo. Este nuevo orujo presenta humedades en torno al 65% (Suria, 1996) y un contenido en azúcares elevado. Estas características marcan un comportamiento especialmente conflictivo que es necesario tener presente a la hora del secado y aprovechamiento posterior del orujo.

En la tabla 1.3 se muestra la composición química de orujos de dos fases y de tres fases, a la salida del decantador (Uceda et al, 1995 a y b) y una vez deshidratados (Alba, 1994 b).

El orujo de dos fases contiene un elevado grado de humedad, además de sustancias químicas tales como polisacáridos, tabla 1.3, que en el proceso de tres fases iban disueltos en el alpechín. El conjunto de todos estos compuestos generan una dificultad en la fluidez y en los tratamientos a los que, en base a un aprovechamiento industrial, debe ser sometido el orujo. Como dificultades fundamentales caben destacar la dificultad en el manejo (mucho agua presente), la dificultad del secado (muchos azúcares que se caramelizan y producen aglomeración de partículas en los secaderos) y el encarecimiento de dicha operación básica (mucho agua evaporada).



Tabla 1.3.- Composición química de los orujos en función del proceso productivo

	2 Fases	3 Fases
ORUJOS A LA SALIDA DE DECANTER		
<i>Producción de orujo (kg/kg de aceituna)</i>	0.8	0.5
<i>Humedad (%)</i>	55	48
<i>Grasa (%)</i>	3	3.4
<i>Azúcares (%)</i>	4.8	2
<i>Polifenoles (ppm)</i>	23.000	10.000
<i>N % (sobre seco)</i>	0.8	0.5
<i>P % (sobre seco)</i>	0.25	0.12
<i>K % (sobre seco)</i>	1.8	0.5
ORUJOS DESHIDRATADOS Y DESENGRASADOS		
<i>Azúcares solubles (g/100 g aceituna)</i>	0.31	0.22
<i>Glucosa (g/100 g aceituna)</i>	$6.8 \cdot 10^3$	1.09
<i>Sacarosa (g/100 g aceituna)</i>	$2.08 \cdot 10^3$	1.87
<i>Manitol (g/100 g aceituna)</i>	$28.86 \cdot 10^3$	42.50
<i>Nitrógeno proteico (g/100 g aceituna)</i>	1.63	1.34
<i>Ac. Glutámico (g/100 g proteína)</i>	15.8	10.3
<i>Treonina (g/100 g proteína)</i>	6.9	5.5
<i>Metionina (g/100 g proteína)</i>	1.6	1.3
<i>Nitrógeno no protéico (g)</i>	< 0.02	< 0.02
<i>Polifenoles (g/100 g aceituna)</i>	0.08	0.06
<i>Ac Quínico (g/100 g aceituna)</i>	$3.77 \cdot 10^3$	5.94
<i>Ac Succínico (g/100 g aceituna)</i>	$13.21 \cdot 10^3$	9.14
<i>Fibra Total (g/100 g aceituna)</i>	20.72	18.64
<i>Cenizas (g/100 g aceituna)</i>	0.95	1.03

La composición del orujo generado depende de múltiples factores, principalmente de la variedad de la aceituna. En la tabla 1.4 se exponen, en el ámbito informativo (Alba, 1994) y comparativo, los valores medios facilitados por productores y extractores de diversas variedades de aceitunas y de diferentes zonas de producción.

Como se puede observar en las tablas 1.4 y 1.5 la humedad del orujo varía desde valores medios del 53.57% y el 58.97%. En cuanto al contenido graso medio en base seca y en base húmeda, el contenido graso en base seca oscila en un intervalo de valores aproximadamente de un 3%, en función de la aceituna analizada, y de un 1% cuando se expresa en base húmeda. Estos intervalos son relativamente estrechos, teniendo en cuenta las variedades de aceitunas analizadas.



Tabla 1.4 - Características de orujos de aceitunas generado mediante el sistema de dos fases.

SISTEMAS DE CENTRIFUGACION DE DOS FASES			
VARIEDAD	HUMEDAD (%)	C. GRASO (% b.s.)	C. GRASO (% b.h.)
<i>Manzanilla</i>	58.11	9.43	3.95
<i>Lechin</i>	57.12	8.36	3.58
<i>Verdial</i>	54.93	8.53	3.84
<i>Arbequina</i>	57.6	6.19	2.63
<i>Hojiblanca</i>	55.70	7.14	3.16
<i>Picual</i>	53.57	6.28	2.92
<i>Cornicabra</i>	58.19	8.14	3.40
<i>Farga</i>	58.97	6.34	2.60
<i>Sevillena</i>	58.97	6.34	2.60
<i>Morruda</i>	58.97	6.34	2.60

Tabla 1.5.- Valores medios de contenido graso en función del sistema de elaboración

SISTEMA DE ELABORACIÓN	C. GRASO (% b.s.)		C. GRASO (% b.h.)	
<i>Prensa</i>	8.51		6.23	
<i>Tres Fases</i>	7.14	7.05	3.64	3.61
<i>Dos Fases</i>	7.31	7.11	3.13	3.03

Otro factor del que dependen las características que presenta el orujo es el tiempo de almacenamiento de éste ya que, debido fundamentalmente al alto contenido en agua que posee, dentro del mismo se llevan a cabo reacciones hidrolíticas y fermentativas que favorecen determinados procesos de esterificación. Estos tiempos pueden poner de manifiesto nuevos parámetros de calidad de los aceites producidos a partir del orujo.

El orujo de dos fases es susceptible de ser utilizado para utilidades diversas. Por ejemplo, en principio y en base a los datos mostrados en la tabla 1.3, el orujo puede ser utilizado como una fuente de proteínas para la producción de concentrados aislados proteicos, estos concentrados constituyen el punto de partida para la obtención de las oleocinas (Alba, 1994 b). Las oleocinas son una clase de proteínas anfipáticas con un elevado poder emulsionante y de diferentes tipos de hidrolizados, mediante el uso de proteasas, pueden cubrir ciertas lagunas existentes en una nutrición específica clínica, animal e infantil. En relación con la composición básica de la fracción sólida del orujo se están realizando investigaciones sobre la composición del material lignocelulósico (Valiente et al, 1995). Actualmente, el orujo esta siendo utilizado industrialmente dentro del mundo oleícola, para obtener un aceite de oliva de una calidad mayor que el aceite de oliva refinado mediante una técnica llamada comúnmente repaso.



La técnica del repaso consiste en someter de nuevo al orujo de dos fases a un proceso de decantación en decantadores de dos o tres fases de semejantes características a las ya mencionadas (Hermoso et al, 1995). Como paso previo a este proceso de decantación, en algunas almazaras, al orujo se le hace pasar por distintos equipos tales como molinos de martillos y despulpadoras, donde se separa la fracción de hueso y de pulpa, utilizando la pulpa para procesos posteriores. En la tabla 1.6 se muestran algunas características del aceite generado en función de los tratamientos a los que ha sido sometido el orujo cuyas características son mostradas en la tabla 1.7. En la tabla 1.6 la letra y el orden designa el equipo que ha sido utilizado y el orden respectivamente como paso previo a la decantación, en este caso por M se designa un molino de martillos y por D la despulpadora, el número hace referencia al diámetro de la criba, la batidora ha sido utilizada en la totalidad de los casos que se muestran en la tabla 1.6.

Tabla 1.6.- Características del aceite producido

MUESTRA DE ACEITE SALIDA DEL SEGUNDO DECANTADOR (¹)					
	M3	M2.5	D3M2.5	M4	M4D3
Acidez (%)	1.02	1.06	1.06	1.1	1.49
Índice de Peróxidos (meq O₂/kg)	16.6	20.4	16.5	20.3	24.9
K₂₇₀	0.22	0.25	0.27	0.29	0.34
K₂₃₂	1.62	1.66	1.80	2	1.94
ΔK	0	0	0	0	0

(¹) Datos obtenidos en la Cooperativa "Virgen de Guadalupe", Úbeda (Jaén). Con la colaboración de Westfalia Separator A. G.

Tabla 1.7.- Características del orujo de dos fases

MUESTRA DEL ORUJO DE DOS FASES SALIDA DEL DECANTADOR (¹)	
Humedad (%bh)	62.06
C. Graso Húmedo (% bh)	2.34
C. Graso Seco (% bs)	6.17
Acidez (%)	2.51

(¹) Datos obtenidos en la Cooperativa "Virgen de Guadalupe", Úbeda (Jaén). Con la colaboración de Westfalia Separator A. G.

Como se muestra en la tabla 1.6, tanto la acidez como los índices de oxidación del aceite no muestran una clara dependencia con el equipo utilizado ni con el diámetro de éstos. Sin embargo, el índice de peróxido muestra una clara dependencia con estos equipos, mostrando que el grado de conservación del aceite producido en la segunda decantación, es de peor calidad sobrepasando el



valor de 20 en los casos de utilizar un molino con un diámetro de criba de 2.5 mm. y de 4 mm. y sobre todo cuando el orujo se trata por un molino de 4 mm y una despulpadora con una criba de 3 mm.

En la tabla 1.8 se muestra algunas de las características del orujo producido en la segunda decantación del orujo.

Tabla 1.8.- Características del orujo de segunda decantación

MUESTRA DE ORUJO A LA SALIDA DEL SEGUNDO DECANTADOR ⁽¹⁾					
	M3	M2.5	D3M2.5	M4	M4D3
Humedad (% b.h.)	64.61	63.74	64	65.02	65
C. Graso Húmedo (% b.h.)	2.17	2.25	2.71	2.26	2.30
C. Graso Seco (% b.s.)	6.13	6.21	8.79	6.46	8.36
Acidez (%)	1.74	1.80	1.88	1.77	2.32

⁽¹⁾ Datos obtenidos en la Cooperativa "Virgen de Guadalupe", Úbeda (Jaén). Con la colaboración de Westfalia Separator A. G.

En la tabla 1.8 es de destacar la alta humedad de este subproducto al igual que en el caso de la humedad del orujo de primera decantación mostrado en la tabla 1.7. Por otro lado, la acidez es relativamente elevada aunque no presenta una gran dependencia con el equipo utilizado antes de la segunda decantación. Por último, cabe destacar la diferencia de contenido graso que se muestra en la tabla 1.7 y en las columnas correspondientes a D3M2.5 y M4D3 de la tabla 1.8. Esto es debido a que el sólido, en el último caso, antes de llevarse a cabo la segunda decantación, ha sido tratado por medio de una despulpadora para reducir el contenido de hueso (contenido graso bajo) del sólido, por ello en la pasta hay una mayor cantidad de pulpa, con un mayor contenido graso.

Sobre la base de las analíticas mostradas en las tablas 1.7 y 1.8, se deduce que existen sensibles diferencias en cuanto a la composición química, dependientes éstas entre otros factores de los tratamientos a los que es sometido el orujo. Dichas características son a su vez fuertemente dependientes de otros factores tales como la procedencia de la aceituna, condiciones de almacenamiento, tratamientos previos, etc. Además, los orujos son diferentes de una campaña a otra, e incluso dentro de la misma campaña (Hermoso et al, 1995) dichos sólidos también presentan características distintas, en función de la zona de recolección.



1.2.- ASPECTOS GENERALES DEL SECADO

Se entiende por secado de un sólido a la separación total o parcial del líquido que lo acompaña (Bueno e Iglesias, 1993). El secado difiere de la evaporación, que también puede definirse así, en los aparatos, los métodos usados y los productos obtenidos. Así, en la evaporación, el líquido se elimina por ebullición, mientras que en el secado el líquido es arrastrado por el aire en forma de vapor a temperatura generalmente inferior a la de ebullición. De cualquier forma, las diferencias son más cuantitativas que cualitativas, por ello no ha de extrañar que en algunos casos sea difícil la clasificación de un proceso como uno u otro tipo de operación.

El secado es una operación importante en muchas industrias químicas, alimentarias y de transformación. La razón por la que se aplica el secado puede ser alguna de las siguientes:

- Facilitar el manejo posterior del producto
- Permitir el empleo satisfactorio del mismo
- Reducir los costes de embarque y transporte
- Aumentar la capacidad de los aparatos
- Preservar los productos de fermentaciones indeseables durante el almacenamiento y el transporte
- Aumentar el valor o utilidad de los productos residuales

En la práctica del secado es frecuente que el líquido a separar sea el agua y a este caso se refiere lo que sigue. La teoría de secado comprende dos aspectos esenciales: las relaciones estáticas y las cinéticas o de velocidad de operación. A continuación se trata en primer lugar ambos aspectos, para pasar posteriormente a un estudio de los aparatos utilizados en la industria de secado.

1.2.1.- Teoría del secado

Para estudiar el secado de los sólidos, ya sea desde un punto de vista teórico o experimental, es preciso definir proporciones relativas de agua y sólido seco contenido en el mismo, es decir, determinar la humedad del sólido. Éstas se pueden definir fundamentalmente de dos formas diferentes: en base seca, refiriendo el contenido del líquido al peso de sólido seco, que



se mantiene constante en la totalidad del proceso de secado, o en base húmeda referida ésta a la masa total de sólido seco más el agua (sólido húmedo). A lo largo de la exposición se utilizará esta última para designar, identificar y determinar las humedades de las muestras objeto de estudio.

1.2.1.1.- Estática del secado

En presencia de un líquido volátil, los sólidos insolubles pueden comportarse como húmedos, considerando que éste es totalmente inerte para con el agua que le acompaña, o bien como higroscópicos. Se llaman cuerpos húmedos a aquellos cuya tensión de vapor de agua es igual a la del agua pura a la misma temperatura. Por el contrario, el cuerpo higroscópico tiene una tensión superficial menor que la del agua a la misma temperatura; el cuerpo higroscópico modifica la tensión de vapor del agua que está ocluida en sus poros o entre las partículas del mismo (Bueno e Iglesias, 1994).

La tensión de vapor de agua sobre un cuerpo ligeramente higroscópico depende de cuatro factores: temperatura, naturaleza del cuerpo, estado de su superficie y proporción de agua (humedad). A temperatura constante, la tensión de vapor de agua aumenta continuamente con la humedad hasta alcanzar el mismo valor del agua pura a la misma temperatura. En este punto, el cuerpo empieza a comportarse como húmedo; cualquiera que sea la humedad, la tensión de vapor se mantendrá constante.

Si el cuerpo higroscópico está en contacto con aire en condiciones determinadas, su humedad tiende hacia un valor de equilibrio, que se alcanza cuando la tensión de vapor del cuerpo higroscópico es igual a la presión parcial del vapor de agua en el aire. En lugar de la presión parcial se puede tomar la humedad relativa del aire (ϕ), directamente relacionada con ella, que es la relación entre las presiones parciales actuales y de saturación. A cada humedad del cuerpo le corresponde en el equilibrio una humedad relativa del aire. Tomando estas variables como coordenadas en un diagrama rectangular, se puede obtener la curva de equilibrio, Figura 1.2 (Bueno e Iglesias, 1994).

Con la curva de equilibrio se puede conocer el sentido en que variará la humedad de un cuerpo puesto en contacto con aire húmedo. Si el punto representativo está a la derecha de la curva de equilibrio (punto P en la Figura 1.2) la humedad del sólido tenderá a disminuir, pues la humedad



es superior al valor de la humedad de equilibrio del aire. Si el punto P estuviera a la izquierda de la curva, la humedad del cuerpo tendería a aumentar a expensas del vapor del agua recibido del aire húmedo, en contacto con el sólido.

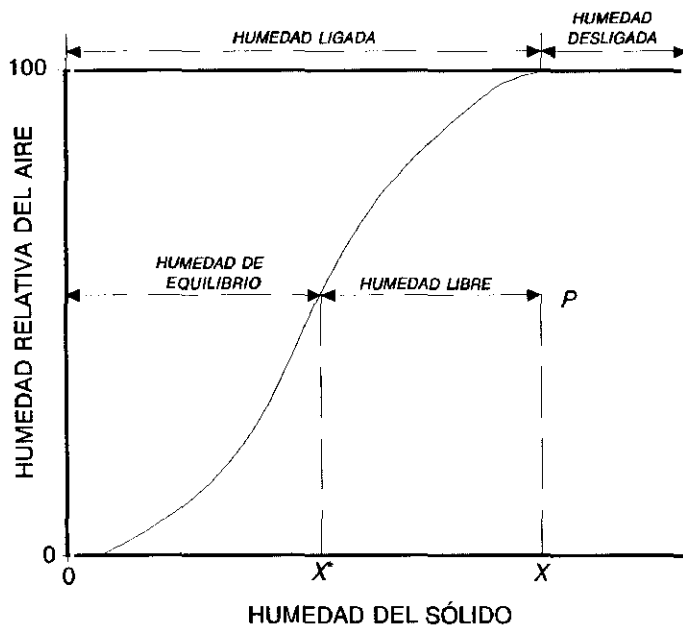


Figura 1.2.- Curva de equilibrio de humedad en el diagrama de fases

La humedad de equilibrio depende del estado de la superficie del cuerpo. La curva de la Figura 1.2 es diferente para cada material específico. Cuando el aire presenta determinadas condiciones se pueden presentar fenómenos de histéresis de secado, debido a que la humedad de equilibrio depende de los cambios de humedad experimentados anteriormente (Bueno et al, 1994 y Jiménez et al, 1980).

La curva de equilibrio de humedad, como la mostrada en la Figura 1.2, permite definir tres tipos de humedades:

- **Humedad libre:** La humedad que puede perder el sólido después de un contacto suficientemente prolongado con aire de condiciones constantes. Por lo tanto, la humedad libre es la diferencia entre la humedad total y la humedad de equilibrio y depende tanto de la humedad del sólido como de la humedad relativa del aire.



- **Humedad ligada**: La humedad mínima necesaria para que el sólido deje de comportarse como higroscópico ó la humedad mínima de equilibrio con el aire saturado.
- **Humedad desligada**: representa la humedad del sólido en contacto con aire saturado, dicho de otro modo, representa la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada. La cantidad de agua contenida en el sólido no está afectada por la presencia del sólido.

1.2.1.2.- Cinética del secado

1.2.1.2.1.- Períodos de secado

Cualquiera que sea el tipo de instalación a emplear, para determinar la capacidad del aparato, o bien el tiempo de secado, es necesario efectuar ensayos de velocidad de secado del material en condiciones constantes de secado, es decir, con las condiciones del aire (presión, temperatura, humedad y velocidad) constantes con el tiempo y variándolo muy poco desde la entrada a la salida del equipo. A intervalos regulares se determina por pesada la humedad del sólido. De estos datos de humedad con respecto al tiempo se obtiene la curva de secado, Figura 1.3. En la Figura 1.3 se representa la variación de la humedad frente al tiempo de una muestra sometida a ensayo de secado; la humedad disminuye continuamente desde el valor inicial (punto A). Finalmente se aproxima como límite a la humedad de equilibrio (X^*) que corresponde a la humedad relativa constante del aire.

Para que los datos obtenidos tengan la máxima validez es necesario observar una serie de precauciones encaminadas a lograr la mayor semejanza con las condiciones que han de prevalecer en la operación a gran escala (Nonhebel et al, 1979). Como más importantes se pueden citar las siguientes:

- El material estará dispuesto en la misma forma que lo ha de estar posteriormente.
- Se dispondrán unas condiciones de transferencia de calor análogas a las empleadas en la operación a gran escala.
- Es conveniente realizar el análisis con diferentes muestras sacadas de distintos puntos del aparato.



La velocidad de secado se define como la pérdida de humedad por unidad de tiempo, más exactamente por la derivada de la humedad respecto al tiempo (cambiada de signo). Para definir cuantitativamente la velocidad, es conveniente referir ésta a la unidad de superficie de secado (Bueno e Iglesias, 1996).

$$W = \frac{S}{A} \left(-\frac{dX}{dt} \right) \quad (1.1)$$

Donde X es la humedad del sólido en base seca ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$); W es la velocidad de secado ($\text{kg}/(\text{h m}^2)$); S , representa el peso de sólido seco (kg); A es el área de superficie expuesta (m^2). Estas dos últimas magnitudes permanecen constantes durante el ensayo de secado, luego la forma de la curva de secado mostrada en la Figura 1.3 no se altera por sustituir $-dX/dt$ por W .

En la Figura 1.4 se muestra, a modo de ejemplo, la variación de la velocidad de secado respecto a la humedad. En dicha figura aparecen varios tramos diferentes (Bueno e Iglesias, 1996):

- **Tramo AB** Corresponde al llamado periodo de inducción, en el que el mecanismo de secado no ha llegado a estabilizarse. (puede o no existir y de existir puede presentar distintas formas). Este período se debe a que la temperatura del sólido y del líquido que lo acompaña puede ser menor o mayor que la del aire con el que se pone en contacto. Es un período que generalmente no se considera a efectos de diseño.
- **Tramo BC** Cuando el sólido alcanza la humedad X_B , se puede considerar que está recubierto por una película homogénea de líquido y que éste empieza a secarse con una velocidad constante hasta alcanzar la humedad crítica.
- **Tramo CE** La velocidad de secado empieza a disminuir, alcanzando prácticamente el valor 0, cuando la humedad libre se anula, es decir, cuando la humedad del material es igual a la del equilibrio con el aire de secado. En muchos casos pueden diferenciarse dos períodos de velocidad decreciente: durante el primero la velocidad varía linealmente con la humedad (período CD); en el segundo se pierde esta relación (tramo DE).

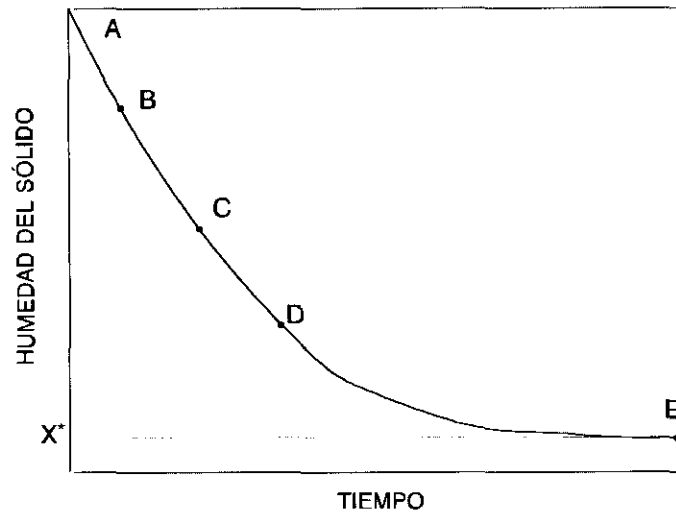


Figura 1.3.- Curva de secado en condiciones constantes

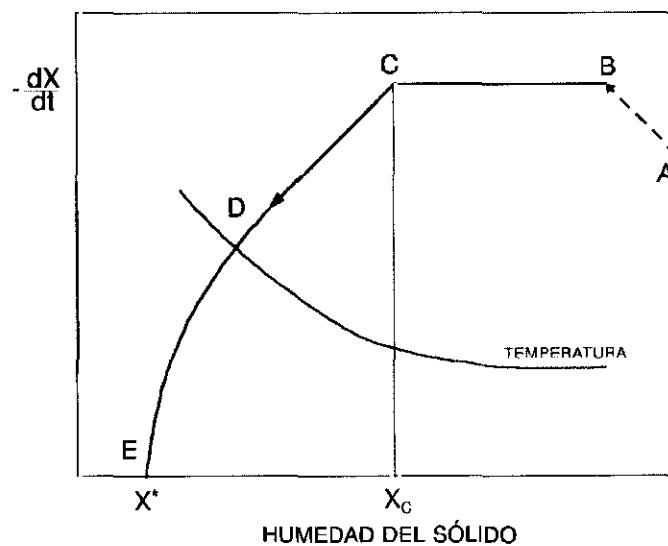


Figura 1.4.- Curva de velocidad de secado en condiciones constantes.

Se distinguen así dos períodos importantes de secado:

1. Período de velocidad constante (tramo BC).
2. Período de velocidad decreciente (tramo CE).

Como es evidente, la presencia de los tres períodos anteriormente mencionados depende del intervalo de humedades abarcado en el ensayo.



1.2.1.2.2.- Mecanismo de secado

Durante el secado es necesario separar tanto la humedad que existe sobre la superficie como la del interior del sólido. Cuando la humedad es suficientemente grande, la evaporación transcurre sobre la superficie totalmente mojada y el líquido se renueva continuamente por difusión rápida desde el interior del sólido y la velocidad de secado es constante. Si el sólido no recibe calor por otros medios, la temperatura de su superficie permanece constante en un valor sensiblemente igual al de la temperatura húmeda del aire (Kneule, 1966) (mostrada en rojo en la Figura 1.4). En la tabla 1.9 se indican las velocidades de evaporación del agua sobre diversos materiales en condiciones de secado constante. Puede observarse que el tipo de material secado no presenta una gran influencia en la velocidad de secado.

Tabla 1.9.- Velocidades de evaporación de agua sobre varios materiales en condiciones medias

MATERIAS	W (kg/h m²)
<i>Agua</i>	2.7
<i>Pigmento blanco</i>	2.1
<i>Limaduras de latón</i>	2.4
<i>Torneaduras de latón</i>	2.4
<i>Arena fina</i>	2-2.4
<i>Arcillas</i>	2.3-2.7

Cuando la humedad media del sólido es inferior a la humedad crítica X_c (punto C de la Figura 1.3) la difusión desde el interior no puede suministrar todo el líquido que se evapora en la superficie; en consecuencia, la velocidad de evaporación disminuye y aparecen sobre la superficie zonas secas, cada vez en mayor proporción. Transcurre entonces el primer período de velocidad decreciente: al no estar saturada la superficie la temperatura asciende, y tiende a aproximarse a la temperatura seca del aire mostrada en rojo en la Figura 1.4. El primer período de velocidad decreciente, que puede no existir según las condiciones de secado, concluye cuando la superficie del sólido queda libre de líquido; a pesar de ello, la humedad media del sólido puede tener todavía un valor apreciable.

Durante el segundo período postcrítico la velocidad de secado sigue descendiendo. En muchos casos la evaporación se efectúa en un plano interior, que va alejándose de la superficie del sólido a medida que progresa el secado. Al transporte del líquido desde el interior hasta el plano de



evaporación seguirá entonces la difusión del vapor desde este plano hasta la superficie del material, y por último la difusión desde la superficie hasta el seno del aire. En otros casos, la evaporación sigue efectuándose en la superficie, y el líquido llega hasta ella por los mecanismos de difusión normal, capilar u otros métodos de difusión más complejos. (Foust et al, 1968 y Vian et al, 1969).

1.2.1.2.3.- Condiciones óptimas de secado

El incremento térmico o diferencia de temperaturas entre la del aire de entrada y la del sólido, es conocido como el potencial de desecación del aire, y se puede utilizar como medida de la eficacia del proceso de secado.

En lo que se refiere a la capacidad de producción de un determinado aparato, es evidente la conveniencia de efectuar el secado en el tiempo mínimo, es decir, con un potencial de desecación máximo, pero hay otras consideraciones que limitan el potencial utilizable en cada caso:

- Las sustancias termosensibles condicionan la temperatura de operación, además del tiempo de contacto del fluido con el sólido a tratar. Se requieren temperaturas y/o tiempo de contacto reducidos, con el fin de no degradar las características y propiedades del sólido; esto tiene una gran repercusión sobre todo dentro de la industria agroalimentaria.
- En algunos cuerpos el secado rápido da lugar a estructuras superficiales cerradas (Clemente et al, 1999), que impiden el paso posterior de la humedad a su través; con ello no sólo se afecta la calidad del producto final sino que también puede aumentar la duración del secado, en contra de la finalidad perseguida.

Por todo esto, desde un punto de vista industrial, es conveniente seleccionar, en función del tipo de contacto sólido-gas que tiene lugar dentro del secadero, una temperatura de operación y tiempo de residencia del sólido dentro del mismo, acorde con las propiedades del sólido húmedo y de las especificaciones requeridas del sólido seco para no degradar el producto final y obtener una capacidad productiva del secadero lo más elevado posible, para, de esta forma, conseguir un mayor rendimiento económico dentro del proceso.



1.2.1.3.- Secado de productos heterogéneos

Las consideraciones teóricas a las que se ha hecho referencia de forma muy somera anteriormente solamente son válidas para sistemas simples. Los productos heterogéneos son más complejos en cuanto a su tratamiento, aunque los conceptos teóricos de la operación de secado siguen siendo aplicables. En este grupo se pueden clasificar las proteínas, grasas, carbohidratos, vitaminas, enzimas, sales inorgánicas, tejidos vegetales y animales y otros compuestos que están fuertemente hidratados. El agua presente en estas sustancias no se encuentra en estado puro sino que puede estar en forma de solución de sólidos, de gel, en emulsión o ligada de diversos modos a los constituyentes sólidos. En cuanto a los tejidos vegetales y animales son de naturaleza celular hecho que también afecta a su conducta durante la desecación.

Las características de los productos heterogéneos hacen que durante la operación de secado tengan lugar otros fenómenos como: movimiento de soluto, retracción y procesos de endurecimientos superficial, como se comentará a continuación.

1.2.1.3.1.- Movimiento de solutos

Una característica singular e importante de la desecación de alimentos es el movimiento de sólidos solubles que se produce durante la desecación. El agua líquida que fluye hacia la superficie durante la desecación contiene diversos productos disueltos. Durante este proceso se puede producir una deposición de componentes solubles en la superficie al evaporarse el agua. Puede ocurrir que la migración de sólidos solubles sea en la dirección opuesta, es decir, hacia el interior del sólido. Cuando la superficie se deseca, se establece un gradiente de concentración entre la superficie y el centro húmedo del sólido que puede dar origen a la difusión de productos solubles hacia el centro. El que predomine uno u otro de ambos fenómenos depende de las características del producto y de las condiciones de desecación.

En otros casos el movimiento de algunos compuestos solubles resulta impedido por las paredes celulares que actúan como membranas semipermeables. La migración de sólidos en los alimentos contribuye a la retracción del producto y crea presiones en el interior de las piezas.



1.2.1.3.2.- Retracción

Durante la desecación de los tejidos animales y vegetales y productos coloidales, por cualquier método, se produce cierto grado de retracción del producto. Este proceso siempre tiene lugar independientemente del método de secado utilizado, con la posible excepción de la liofilización. En las primeras fases de la desecación a baja velocidad la cuantía de la retracción esta relacionada con la cantidad de humedad eliminada. Hacia el final del secado, la retracción es cada vez menor de modo que el tamaño y la forma finales o definitivas del producto se alcanzan antes de completarse la desecación (Clemente et al, 1999).

La densidad y porosidad de los productos dependen en gran medida de las condiciones de secado, analizando la retracción en función de la velocidad de secado, se tiene que:

- Si las velocidades iniciales de secado al principio son altas las capas externas se hacen rígidas y las partículas del sólido adquieren el tamaño final y definitivo más precozmente durante la desecación. Al continuar la desecación, los tejidos se rompen internamente dando origen a una estructura más abierta. En estas condiciones el producto tiene poca densidad y posee buenas características para la rehidratación.
- Si las velocidades iniciales de secado son bajas el sólido se retrae más y el producto adquiere una mayor densidad.

La retracción de los sólidos durante la desecación puede influir en la velocidad de secado debido a los cambios en las áreas de superficie de desecación y a la creación de gradientes de presión en el interior del producto.

1.2.1.3.3.- Endurecimiento superficial

Se ha observado que durante el secado de algunos productos, frecuentemente se forma en la superficie una película impermeable y dura. La formación de la película produce, normalmente, una reducción de la velocidad de secado. A este fenómeno se le suele denominar endurecimiento superficial y es probable que esté influido por múltiples factores, entre los que figuran la migración de sólidos solubles hacia la superficie y elevadas temperaturas en la superficie del sólido. El hecho de que hacia el final de la desecación se alcancen elevadas temperaturas en el sólido induce complejos cambios físicos y químicos en la capa superficial del mismo.



1.2.1.4.- Secado de productos agrícolas

Para almacenar los productos agrícolas se recomienda que no posean una humedad superior al 4-6% (base húmeda), con el fin de evitar la posibilidad de formación de mohos, fermentación, bacterias, etc., que afectaría notablemente a su calidad.

Los productos agrícolas poseen una estructura compleja, integrada en su mayor parte por moléculas de elevado peso molecular tales como proteínas, hidratos de carbono y lípidos, de distinta solubilidad en agua. La mayoría de los productos agrícolas deshidratados son productos higroscópicos. Su contenido en humedad depende de la humedad relativa del aire (ϕ) que los rodea, por lo tanto antes de realizar un estudio del secado, es adecuado hacer un análisis de las humedades de equilibrio de estas sustancias. Al representar gráficamente en coordenadas cartesianas, sus isotermas de equilibrio suelen obtenerse curvas tipo semejantes a la Figura 1.2, similares a las isotermas de adsorción pero en las que aparece el fenómeno de histéresis (el camino seguido en el proceso de secado no es igual al de hidratación). Ambas circunstancias parecen indicar que el agua puede ser retenida por el sólido mediante un fenómeno de adsorción física.

A escala industrial, la técnica del secado se viene utilizando con éxito en la conservación de algunos vegetales como frutas, hortalizas, granos, etc.. Esta operación de secado se desarrolla normalmente en secaderos en los que el producto a secar está en una posición fija desde el principio al final de la operación, generalmente sobre bandejas perforadas, o sistemas análogos en los que el sólido tiene un cierto movimiento producido por la vibración (Keller et al, 1996) o desnivel. También se han utilizado lechos fluidizados convencionales.

1.2.2.- Equipos de secado

Existen numerosos tipos de aparatos de secado, que se ajustan a los diversos productos a secar y a las diferentes condiciones de operación. La clasificación de los aparatos puede establecerse con arreglo a varios criterios, basados en aspectos tales como:

Tipo de producto a tratar: Es indudable que el modo en que se realiza el secado dependerá, en primer término, del tipo de materia que va a someterse a desecación. El secado, por ejemplo, de una materia granular es distinto que el de otra que se presente en forma pastosa, y éste es diferente del secado de una hoja o lámina continua. En cada caso se



emplearán métodos y aparatos diferentes. Para el secado de pieles, cueros, etc. se utilizan cámaras de secado o túneles de secado. Este sistema de secado puede ser también utilizado para materiales granulares o pulverulentos, la única diferencia es su disposición dentro de la cámara, en el primer caso es tendido mediante ganchos y en el segundo es dispuesto en bandejas, sobre las que se hace pasar una corriente de aire caliente.

Método de Calefacción: Hay dos tipos de aporte de energía: calefacción directa o indirecta. Por ejemplo, en el secado de láminas adhesivas, pinturas, películas fotográficas, superficies metálicas, etc., es más efectivo un aporte de calor indirecto por radiación empleando lámparas de radiación infrarroja o calentamiento por inducción de alta frecuencia, ya que por cualquiera de los métodos anteriormente mencionados se pueden alcanzar altas temperaturas y no se produce un contacto entre el material y la fuente de energía. Por otro lado, existen sistemas de secado basados en una calefacción directa donde se produce un contacto entre el aire caliente y el sólido a tratar, como es el caso del secado de productos agrícolas, arena o carbón (Kindelan, 1994).

Modo de funcionamiento: En la operación de secado lo mismo que en otras muchas, pueden emplearse aparatos continuos o discontinuos, las ventajas relativas de unos y otros pueden estudiarse con carácter general y dependen poco de la aplicación de que se trate. En un secadero continuo el producto se desplaza con movimiento uniforme desde el extremo de la entrada hasta la salida, y las condiciones de cualquier punto del aparato se mantienen constantes con el tiempo. Por el contrario, en el secadero discontinuo el producto puede estar estático, y las condiciones de secado varían con el tiempo.

Producción: Considerando la cantidad de producto a secar por unidad de tiempo se establecen tres niveles de producción:

- Producción pequeña: la producción es de 20-50 kg/h, los sistemas de secado más apropiados serán por cargas (proceso discontinuo), entre los que cabe destacar entre otros: a vacío, en bandejas, con circulación de atmósfera, lecho fluidizado.
- Producción media: La producción es de 50-1000 kg/h, los secaderos más apropiados pueden ser por cargas o continuos. En la producción por cargas cabe destacar: circulación de atmósfera y de lecho fluidizado; en continuos: lecho fluidizado, a vacío, rotatorios, con rociadores, arrastre neumático.



- Producción alta: Se extiende a producciones mayores de 1 t/h, Estos secaderos son en su totalidad continuos y pueden ser rotativos, de transporte neumático o de lecho fluidizado.

Al intentar describir los aparatos es difícil encontrar un orden lógico de clasificación dentro de las características diferenciales ya expuestas. Dado que esta investigación está enfocada al secado del orujo, se describirán únicamente los secaderos utilizados con este fin. El secadero que de forma más general se está utilizando en el tratamiento de residuos de la industria oleícola, es el secadero rotatorio o trommel (Suria, 1996) por ello se realiza una breve descripción de este secadero, para posteriormente tratar los secaderos basados en lecho fluidizado y transporte neumático.

1.2.2.1.- Secaderos rotatorios

Son dispositivos para el secado de sustancias granulares o pulverulentas con agitación continua de las mismas. Constan de un cilindro horizontal rotativo, ligeramente inclinado desde el extremo de entrada al de salida, en su interior circula continuamente el producto, en contacto con aire o gases de combustión calientes como se muestra en la Figura 1.5. Los secaderos rotatorios pueden funcionar con corriente de aire paralela o en contracorriente con respecto al avance del sólido húmedo.

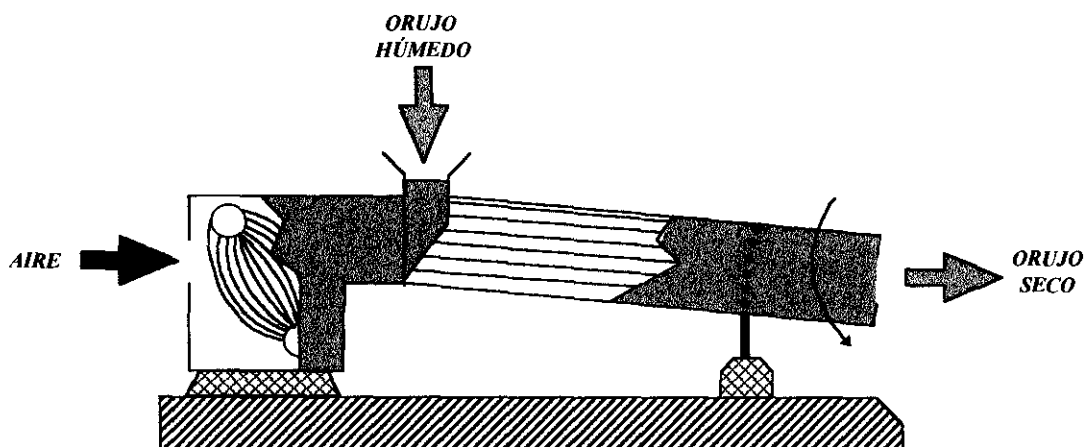


Figura 1.5.- Sección longitudinal de un secadero rotatorio, con calentamiento mediante gases de combustión en corriente paralela.



El movimiento lento de rotación se transmite mediante engranajes periféricos. Estos secaderos se diseñan mediante pruebas experimentales, pero se puede hacer un cálculo aproximado de su diámetro mediante la ec. 1.2:

$$D = \sqrt{\frac{0.1 \cdot q}{\pi \cdot G \cdot C_p \cdot \Delta t}} \quad (1.2)$$

donde D es el diámetro del cilindro (m), q el calor total transferido por el gas caliente al sólido a secar por hora como calor sensible más las pérdidas (J/h), G velocidad de masa del gas kg/(h·m²), C_p el calor específico del gas (J/(kg·°C)), Δt la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del secadero (°C). En general, el diámetro del cilindro oscila de 0.6 a 2 m. En cuanto a su longitud varía entre 4 y 10 veces el diámetro.

Los diferentes tipos de secaderos rotatorios de calefacción directa difieren en la disposición de los tabiques en el interior del cilindro. La disposición debe ser tal que se logre un “zarandeo” activo del producto y un buen contacto entre los gases de secado y el producto húmedo (Frey, 1998). Los dispositivos que se muestran en la Figura 1.6 son comúnmente utilizados en cualquier secadero rotatorio: las paletas (Figura 1.6 b) están muy extendidas para el secado del orujo de dos y tres fases, por otro lado la disposición de tabiques mostrada en la Figura 1.6 (a) es de las más efectivas para generar un cortina de producto y mejorar el contacto sólido-gas. A los secaderos sin dispositivo interno se le suele llamar hornos rotatorios y operan a temperaturas más elevadas, en general su cara interna esta protegida con ladrillo refractario.

El valor de la temperatura en la boca de salida del secadero rotatorio depende del balance entálpico y de masas en base a la cantidad de aire que se use, temperaturas y humedad del sólido a la entrada, el tamaño del secadero y el tiempo de residencia del sólido. Friedman y Marshall (Friedman y Marshall, 1949), estudiaron los factores que modifican el tiempo de residencia y la transferencia de calor en secaderos rotatorios.

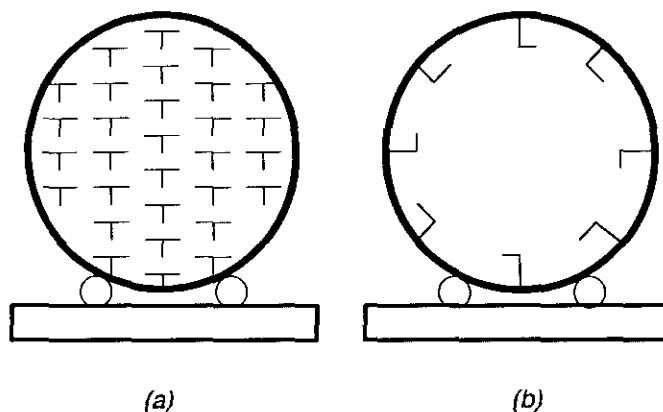


Figura 1.6.- Secciones tipo del secadero rotativo

En muchos casos los gases que salen del aparato arrastran una buena proporción de sólido en forma de polvo, y por ello siempre es necesario disponer un sistema de recuperación del sólido que evite la pérdida de producto. Para tal fin se disponen ciclones, éstos separan las partículas de tamaño pequeño (polvo) y el aire que las transporta (Sánchez y Plumez, 1998). Combinando el trabajo de los ciclones, con el del secadero y con el de un molino de bolas o de martillos se obtiene un sistema en el que se pueden realizar simultáneamente la desecación, la molienda y la clasificación por tamaños. La secuencia de estas tres operaciones es relativamente frecuente en la práctica industrial.

1.2.2.2.- Secaderos neumáticos

En este tipo de secadero el producto húmedo se mantiene en suspensión en una corriente de aire caliente que lo transporta a través del sistema de desecación. Es como un secado en lecho fluidizado empleando velocidades de aire más altas.

En un secadero simple de este tipo, el producto de alimentación se introduce en una fuerte corriente de aire caliente y los sólidos son transportados por esta corriente a través de conductos de suficiente longitud para que el tiempo de residencia sea el adecuado. El aire sale del sistema a través de un separador sólido-gas, normalmente de tipo ciclónico, recogiendo el producto seco. En la Figura 1.7 se muestra un secadero de este tipo.

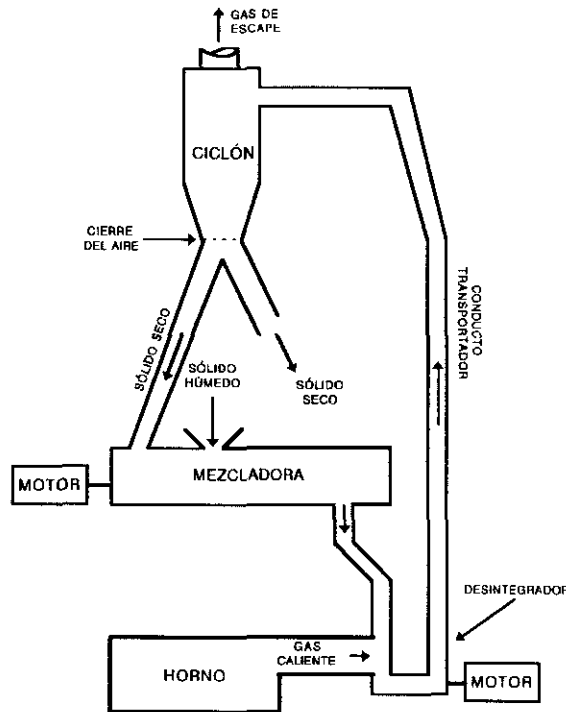


Figura. 1.7.- Secadero con transporte neumático con disgregador (tipo Raymond)

Estos secaderos utilizan temperaturas del aire caliente, dependiendo de las especificaciones de aplicación y producto, del orden de 750°C y, como el tiempo de contacto es breve, la temperatura del gas puede ser alta sin que se produzca la descomposición del material. El caudal de gas suele proporcionar una velocidad superficial de alrededor de 25 m/s (Nonhebel y Moss, 1979). Con frecuencia, el material se encuentra en una forma tal que requiere alguna fuerza disgregante para que pueda ser transportado, en tales casos se emplea algún molino o disgregador y los gases calientes se avientan a través del material durante la disgregación con lo cual se consigue el 70% del secado. Los secaderos de esta clase tienen nombres diversos tales como secaderos relámpago, secaderos con dispersión, secaderos “trump vertex”.

Los conductos de desecación pueden estar dispuestos verticalmente como en los “Air Lift Driers” (secaderos de aire ascendente) o bien horizontalmente. En los sistemas de paso único la temperatura del aire tiene que ser relativamente alta para evitar conducciones excesivamente largas. Introduciendo en el sistema cámaras de expansión, puede ejercerse un mejor control de la



temperatura del aire en las diferentes fases. Otra posibilidad consiste en disponer en serie dos o más secaderos y suministrar a cada uno aire fresco.

Existe un secadero neumático anular en el que el producto puede permanecer circulando de forma continua durante varios minutos mientras se renueva constantemente el aire de desecación, se introduce producto fresco y se saca continuamente producto seco (Nonhebel y Moss, 1979). En este tipo de unidades el tiempo de desecación puede variarse dentro de un amplio margen.

Las principales características de los secaderos neumáticos son muy similares a las de los secaderos de lecho fluidizado:

- La aplicación de estos secaderos queda limitada a sólidos manipulables.
- Se consiguen altas velocidades de desecación.
- La unidad actúa simultáneamente como secadero y transportador, lo que es útil en determinadas circunstancias.

Los secaderos neumáticos se han usado en el tratamiento de muchos productos alimenticios como granos de cereales, harinas, patatas granuladas, cubos de carne, derivados lácteos, sal común. Como secaderos secundarios de la leche en polvo y ovoproductos. Al margen de la industria alimentaria, se han utilizado en el tratamiento de la hulla, lodos, tortas de filtros de presión, etc. Estos secaderos también sirven para secar sólidos no granulares, en éstos es necesario una disgregación para que se efectúe su dispersión adecuada en la corriente de gas a gran velocidad. Se acostumbra recircular producto seco con el material húmedo de alimentación para facilitar la dispersión y el manejo.

1.2.2.3.- Secaderos de lecho fluidizado

En este tipo de secadero el aire caliente es forzado a través de un lecho de sólidos de forma tal que los sólidos queden fluidizados, suspendidos por el gas caliente. Éste actúa como medio fluidizante y desecante (Gutiérrez, 1999).

Los secaderos de lecho fluidizado pueden operar de forma discontinua o continua. En la Figura 1.8 se muestra esquemáticamente una unidad continua de un solo efecto. La rejilla, que soporta el lecho, puede ser desde una simple placa perforada a diseños muy complejos a base de



eyectores de chorros de aire, cápsulas de borboteo, etc. Algunas unidades poseen bases vibratorias para facilitar el movimiento del producto. En el conducto de salida del aire se incorporan separadores de polvo, normalmente ciclones, para recoger los sólidos finos. Los secaderos pueden operar a presión superior o inferior a la atmosférica, según se precise, situando adecuadamente los ventiladores.

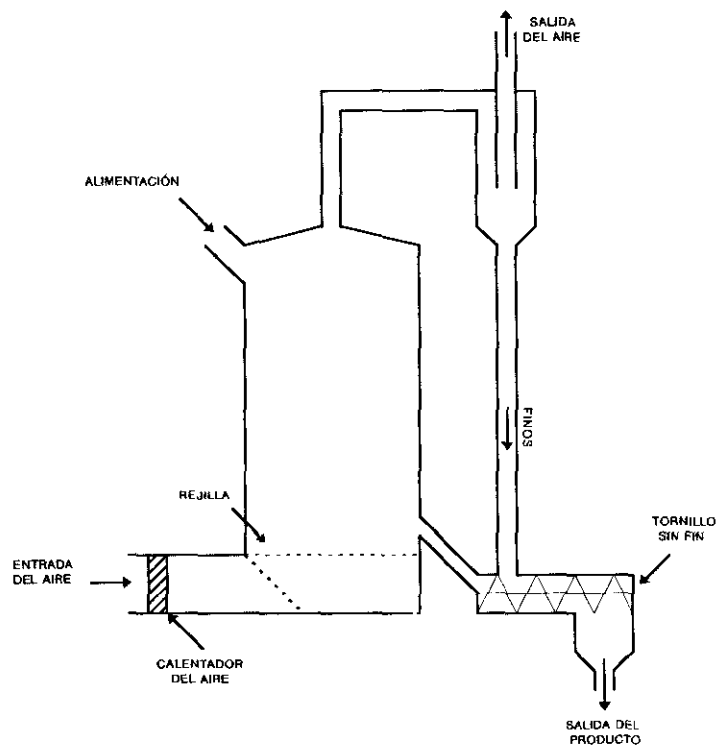


Figura 1.8.- Secadero de lecho fluidizado continuo

Las principales características de los secaderos de lecho fluidizado son:

- Pueden aplicarse a sólidos susceptibles a la fluidización. Algunos alimentos, como los cereales, pueden fluidizarse fácilmente dentro de un amplio margen de contenidos en humedad. Otros productos sólo fluidizan bien si el contenido de humedad es bajo. En último caso, el producto húmedo a veces puede manipularse dispersándolo en un lecho de producto ya secado. Algunos productos son demasiado frágiles para ser fluidizados sin que sufran excesivo daño mecánico.



- Las velocidades de desecación en los secaderos de lecho fluidizado son relativamente altas y se controlan con facilidad.
- En operación discontinua, los sólidos se mezclan bien y se desecan uniformemente. En los sistemas continuos, el mezclado puede determinar la salida del secadero de producto con humedades diferentes a la deseada.



1.3.- LECHOS MÓVILES Y FLUIDIZADOS

Cualquier lecho poroso ya sea fijo, móvil o fluidizado, puede ser definido como un sistema de dos fases, en el cual la fase sólida esta formada por partículas que dejan entre sí huecos o canales que son ocupados por una fase fluida, que puede ser líquida o gaseosa. En general, en todas las aplicaciones de los lechos porosos, existe un movimiento relativo entre ambas fases. Los lechos porosos se pueden clasificar como fijos y dispersos.

Lechos fijos: las partículas del lecho están apoyadas unas sobre otras por acción del peso de las mismas, formando un lecho compacto o empaquetado, no existiendo movimientos relativos de las partículas entre sí. Esto es estrictamente cierto, por ejemplo, en el caso de los hornos verticales de lecho fijo y en las parrillas móviles de sinterización, equipos en los cuales las partículas sólidas están fijas con respecto a las paredes del recipiente que las contiene o las grillas que los soportan. Otros ejemplos de lechos fijos son la torta que se va formando sobre un medio filtrante o el relleno inerte de una columna de relleno utilizada para procesos de absorción (Tominaga y Tamaki, 1997).

Dentro de este grupo se encuentran los **lechos móviles**. El lecho móvil tiene un movimiento descendente por acción de la gravedad, éste tiene lugar, principalmente, como un movimiento conjunto de todo el lecho, es decir todas las partículas se van desplazando hacia abajo aproximadamente con la misma velocidad, de manera que la velocidad relativa entre ellas es nula o muy pequeña. Desde el punto de vista de este estudio, tales lechos pueden ser también considerados como lechos fijos. Como ejemplo de este tipo de lechos están los hornos verticales de lecho móvil del tipo del reactor de reducción directa Midrex (Nonhebel y Moss, 1979 y Tominaga y Tamaki, 1997).

Lechos dispersos: En estos lechos las partículas sólidas que los constituyen son dispersadas en la fase fluida por la acción de fuerzas mecánicas, gravitatorias de arrastre o bien por una combinación de las mismas. Al producirse esta dispersión las partículas pierden contacto entre sí pasando a formar un lecho mucho más abierto, que recibe el nombre de lecho disperso. Como ejemplo de este tipo de lechos se puede mencionar el **horno rotativo** dentro de la fabricación del cemento Portland, en el cual el lecho se dispersa por la acción combinada del movimiento rotativo del horno y de la gravedad. Otro tipo de lechos dispersos son los **lechos fluidizados**, en los que la dispersión del lecho se consigue por la



acción de una corriente gaseosa ascendente, que debe tener una velocidad de flujo lo suficientemente alta como para que la fuerza de arrastre que se origina sobre el lecho compense la acción de la gravedad (Tominaga y Tamaki, 1997). Otra clase de lechos dispersos son los **hornos flash**, en los cuales la dispersión se logra inyectando las partículas finas por medio de una corriente de gases dentro de la cámara de reacción. La inyección se hace a presión por medio de una tobera especialmente diseñada para el manejo de sólidos finos.

En el apartado 1.3.1. se analizan los lechos móviles. De igual forma se describen con más detalle los lechos fluidizados.

1.3.1.- Aspectos generales de los lechos móviles

Como se ha indicado anteriormente, un lecho móvil es, en esencia, un lecho fijo donde el lecho se desplaza de forma solidaria por la acción de fuerzas tales como la gravedad, mecánica, etc. Como ejemplo destacable de dicho tipo de lechos cabe destacar el lecho rotatorio utilizado fundamentalmente dentro de procesos de extracción. Aunque en la realidad los flujos en este tipo de lechos no se ajustan exactamente a situaciones concretas se puede admitir, en algunos casos, un comportamiento ideal sin incurrir en excesivos errores. Este es el caso del lecho móvil donde el tipo de circulación que tiene lugar dentro del lecho es cercano al flujo pistón para el fluido y el sólido (Aznar, 1979).

Una de las primeras aplicaciones de sólidos en flujo pistón fue en 1946 cuando se desarrolló un hipersorbador, para la separación de hidrocarburos ligeros en gas de refinería, utilizándose carbón activo como sorbente y vapor de agua para la regeneración. Dicho contacto se caracteriza porque en una sección de lecho determinada, el flujo del fluido y de sólido es ordenado, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquél. La condición necesaria y suficiente para que exista flujo en pistón es que el tiempo de residencia en el reactor sea el mismo para todos los elementos del fluido. Una aplicación industrial de dicho flujo de sólido es el proceso mediante el cual se elimina SO₂ de los gases de combustión mediante el uso de carbón activo.



1.3.2.- Aspectos generales de la fluidización

El término fluidización se emplea para describir un tipo o modo de contacto entre sólidos granulares y fluidos de tal forma que las partículas sólidas aparecen suspendidas en el fluido ascendente que se desplaza a través del lecho formado por dicho sólido. Si el flujo ascendente de un fluido por un tubo vertical es de suficiente velocidad como para mantener en suspensión con completa libertad de movimiento un conjunto de partículas, con un intervalo de tamaños dado, sin arrastrarlas, se dice que las mismas están fluidizadas, constituyendo un lecho fluidizado.

A escala industrial, la fluidización fue utilizada por primera vez en el proceso Winkler en 1921. Dicha operación apareció, como un intento de solucionar problemas inherentes a la gasificación de carbones que producían cenizas fusibles a la temperatura de trabajo. Dicho procedimiento consistía en someter a las partículas de carbón de pequeño tamaño, a una corriente de gases y vapor de agua con una velocidad tal que no era necesario la presencia de parrilla, pues las partículas se mantenían suspendidas en la corriente gaseosa. En estas condiciones se producía una alta turbulencia denominada capa o lecho turbulento.

El descubrimiento de Winkler no tuvo especial repercusión industrial hasta que veinte años después en Estados Unidos de Norteamérica se recurrió a esta técnica para la resolución de los problemas del craqueo catalítico de productos petrolíferos. En el craqueo catalítico se ponen en contacto los productos petrolíferos con el catalizador. Debido a la deposición de compuestos de alto peso molecular, el catalizador sufre una desactivación y es regenerado en un segundo reactor. Dicho reactor, por igual técnica, se pone en contacto con el aire donde se quema el carbón que lo envenena, quedando así el catalizador regenerado y caliente. Los gases calientes del segundo reactor llevan consigo un calor sensible que se recupera fácilmente como vapor de agua.

Pronto se apreció que esta técnica podía ser empleada para un gran número de procesos que se basaban en el contacto sólido-fluido. A partir de 1943 la utilización de los lechos fluidizados ha ido ampliándose a numerosas operaciones y reacciones dentro del campo de la Química Industrial, entre las que cabe destacar el secado de sólidos, extracción de sólidos con líquidos, adsorción de gases, intercambio de calor sólido-fluido, pirólisis, halogenaciones, oxidaciones (tostación de sulfuros), reducciones, etc. Razón por la cual la fluidización ha sido muy estudiada, tanto desde el punto de vista teórico como de sus aplicaciones prácticas.



1.3.3.- Fluidodinámica de lechos fluidizados

1.3.3.1.- Análisis cualitativo de la fluidización

Una de las formas más utilizadas de generar un contacto sólido-gas basado en un sistema fluidizado es disponer el sólido en el interior de un cilindro vertical, dotado en su parte inferior de una parrilla o de un disco con perforaciones. Por la parte inferior del cilindro se introduce una corriente de fluido (líquido, gas, vapor), tal como se muestra en la Figura 1.9.

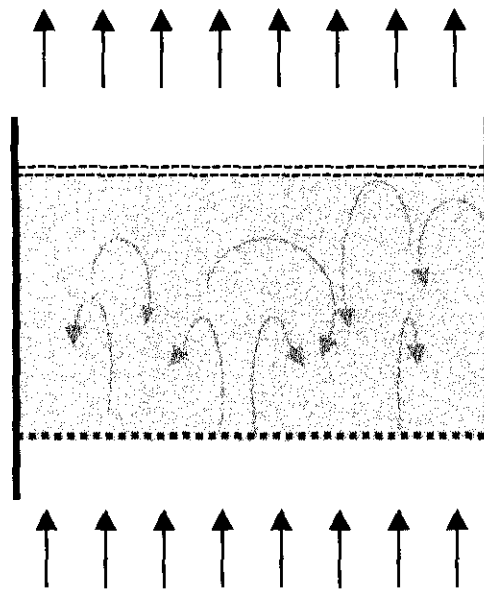


Figura 1.9.- Circulación de las partículas en un lecho fluidizado

Si la velocidad del fluido es pequeña éste se introduce por los espacios intergranulares y genera la correspondiente pérdida de carga, que es función de la permeabilidad o porosidad del lecho, de la rugosidad de las partículas y otras características propias del sólido y algunas propiedades del fluido como puede ser la viscosidad, densidad, etc. Al aumentar la velocidad de paso del fluido llega un momento en que la acción dinámica de éste origina una reordenación de las partículas de manera que opongan la menor resistencia posible al paso del fluido a través del lecho y se produce un aumento de la porosidad de éste. A mayores velocidades, se llega a una situación en la que las partículas dejan de estar en contacto, se individualizan y aparecen como flotando en la corriente de fluido, en esta situación el lecho se ha dilatado notablemente y presenta un aspecto similar al de un líquido en ebullición. Si aun se



aumenta más la velocidad del fluido, se aumenta el estado de agitación de la capa fluidizada y si la velocidad sobrepasa un determinado valor el sólido es arrastrado por el fluido, entrando de esta forma en la región correspondiente al transporte neumático de sólidos.

Un lecho fluidizado sólido-gas, en muchos aspectos, exhibe el comportamiento de un líquido, algunos de dichos aspectos se mencionan a continuación:

- a) Salida de las partículas de sólido por orificios o rebosaderos (Figura 1.10.(a)) .
- b) Igualación de niveles en dos lechos fluidizados contiguos (Figura. 1.10.(b)).
- c) Superficie horizontal del lecho fluidizado inclinado. (Figura 1.10.(c)).
- d) Flotación de los objetos que presentan una menor densidad que el lecho fluidizado (Figura 1.10.(d)).

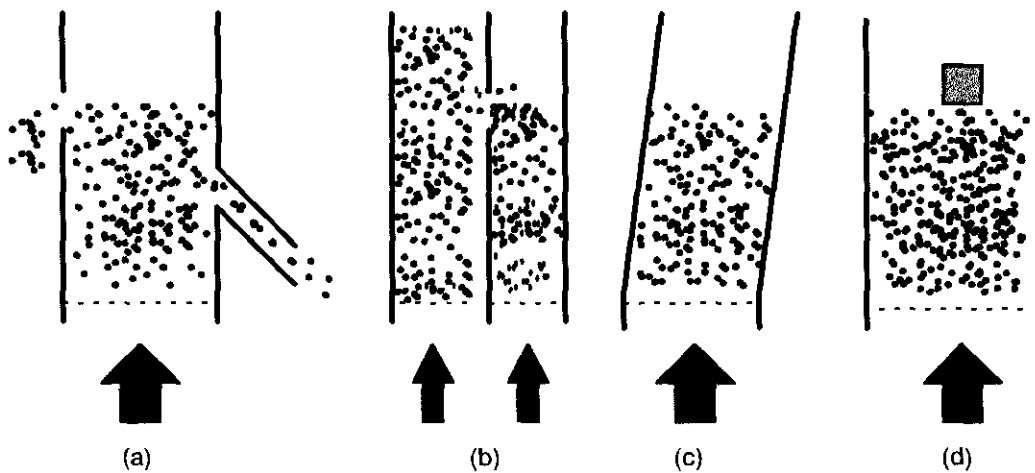


Figura 1.10.- Analogías de comportamiento con los líquidos

Los lechos fluidizados presentan cuatro características que son la base de su aplicación químico-técnica:

1. **Área de interacción sólido-fluido.** En aquellos procesos donde existe una transferencia de materia y/o energía, el intercambio se produce a través de la interfase. La velocidad con que tiene lugar la transferencia es función del área interfacial. Por ejemplo, la velocidad de transferencia de calor está descrita mediante la ecuación de Fourier:



$$\frac{dQ}{dt} = -KA \frac{dT}{dL} \quad (1.3)$$

donde Q es el calor intercambiado, A representa el área superficial de las partículas, T es la temperatura, L es el espesor de la capa interfacial, t es el tiempo. Como se puede observar en la ec 1.3, la transferencia de calor es proporcional al área de intercambio a través de la cual se realiza la transferencia y de la fuerza impulsora que indudablemente influye notablemente en dicho tránsito energético. Dado que en un contactor sólido-gas fluidizado, el sólido está particularizado, se tiene una gran superficie interfacial del sólido, por lo que se tiene una gran velocidad de transferencia energética

2. **Influencia de la turbulencia del contacto.** En la superficie de separación sólido-fluido existe, siempre, una capa de fluido adherida al sólido llamada capa interfacial. En dicha capa, el tránsito energético o de materia se realiza en régimen laminar en el que no existen componentes transversales de la velocidad de manera que la energía y materia deben atravesarla por mecanismos difusivos y no convectivos que producirían un aumento de la velocidad del proceso. El espesor de la capa estática o laminar disminuye aproximadamente con la potencia de 0.7 de la velocidad del fluido.

El grado de turbulencia reinante en el lecho fluidizado afecta al espesor de la capa interfacial. Cuanto mayor es el grado de turbulencia menor es el espesor de la capa interfacial. Por ello, si se realiza una comparación entre un lecho sólido estático donde el régimen de circulación es laminar, y un lecho fluidizado donde el régimen de circulación es turbulento, en este último se produce una extraordinaria disminución de la capa interfacial. Consecuencia de la elevada turbulencia es que la temperatura del lecho y la concentración dentro del mismo son muy uniformes, contrariamente a lo que ocurre en los lechos estáticos atravesados por fluidos.

3. **Facultad de fluir que tienen los lechos fluidizados.** El comportamiento de un lecho fluidizado es similar al de un líquido por lo que tienen la capacidad de fluir a través de orificios. Esta capacidad permite realizar una carga y descarga continuada del sistema, que puede adaptarse a operaciones o procesos que impliquen una producción elevada.
4. **Facilidad de ejecución de los procesos exo o endotérmicos:** Los lechos fluidizados presentan ventajas para el desarrollo dentro de ellos de reacciones donde el calor es un “producto” o un “reactivo”, esto está basado fundamentalmente en:



- Posibilidad de recirculación regulada de los gases de la reacción, después de enfriarlos o precalentarlos.
- Posibilidad de introducir, junto con el sólido principal, otros sólidos de elevado calor específico, fríos o calientes
- Posibilidad de introducir agua u otro líquido de alto calor latente de vaporización y que al vaporizarse contribuya a mantener la temperatura de un lecho exotérmico.
- Posibilidad de eliminar o realizar un aporte indirecto de calor en reactores que tienen dobles paredes en la zona correspondiente al lecho, haciendo circular por el espacio intermedio fluidos fríos o calientes (por ejemplo vapor), los cambiadores de calor que se tendrían son de gran rendimiento, dada la gran capacidad de transmisión de calor de los lechos fluidizados.

Además de las ventajas que se han resumido anteriormente, cabe destacar algunas desventajas que presenta la fluidización:

1. El empleo de productos sólidos con un diámetro de partícula adecuado obliga, la mayor parte de las veces, a una preparación previa del sólido que incluye trituración y tamizado o clasificación, operaciones que pueden encarecer, e incluso hacer prohibitivo el proceso desde el punto de vista económico.
2. Una vez que ha reaccionado la parte externa de la partícula, la transformación de las moléculas situadas en el interior de ella exigen un proceso de difusión del fluido a través de las capas externas que ya han reaccionado, lo que se traduce en una disminución de la velocidad de reacción neta del proceso tratado. Siempre que la etapa de difusión a través del sólido sea lenta nada se puede conseguir con un aumento de la turbulencia dentro del lecho fluidizado.
3. Una característica negativa es la producción de sólidos de pequeño tamaño generados por los choques entre partículas. Como es lógico, este aspecto, además de depender de la turbulencia producida dentro del lecho, depende de la distribución de tamaños de partícula del sólido fluidizado. La proporción de polvo llega a veces a constituir el 60% de la alimentación, lo que encarece la operación global, al ser necesario incluir costosos ciclones y filtros.



1.3.3.2.- Porosidades de lecho

Un lecho poroso está formado por un conjunto de partículas sólidas que dejan huecos y conductos entre sí, que son ocupados por el fluido. La porosidad del lecho se define como la relación existente entre el volumen de huecos (V_H) y el volumen total de lecho (V_L), según se muestra en la ec. 1.4.

$$\varepsilon = \frac{V_H}{V_L} \quad (1.4)$$

de la ec. 1.4 es fácil deducir que la porosidad es una magnitud cuyo valor está comprendida entre cero y uno.

La porosidad de un lecho depende de diversos factores:

- Tamaño y forma de las partículas del lecho.
- Forma de colocar las partículas en el lecho, es decir, si éstas se colocan según un cierto orden o bien en una forma absolutamente irregular. Por ejemplo, un lecho de esferas puede formarse colocándolas en forma cúbica ($\varepsilon=0.476$), ortorrómbica ($\varepsilon=0.395$), tetragonal ($\varepsilon=0.302$), etc.
- Grado de compactación del lecho, cuanto más compacto este el lecho, menor es la porosidad ya que disminuye el volumen de huecos.
- Para lechos fijos formados por partículas gruesas en relación al recipiente (valores altos de dp/D) y para una forma y diámetro de partícula (dp) dados, la porosidad es función de la relación dp/D , siendo D el diámetro del lecho. Esta relación es debida al llamado efecto pared que hace que la porosidad sea mayor cerca de la pared del recipiente que contiene el lecho.

Los lechos fijos formados por materiales granulares o cristalinos normales suelen presentar porosidades comprendidas entre 0.32 y 0.45. Las monturas de Berl o los anillos de Raschig originan lechos más porosos (0.70 a 0.85).

En la Figura 1.11 se muestra la evolución de la porosidad con la velocidad del agente



fluidizante. Como se puede observar en dicha figura para valores bajos de velocidad en los que el lecho se comporta como lecho fijo (correspondientes a puntos a la izquierda del punto O) la porosidad es constante. Al aumentar la velocidad (entre los puntos O y P) el perfil de porosidades del lecho fluidizado pasa desde mínimo estado fluidizado hasta la velocidad de arrastre. Valores de velocidad superiores al punto P corresponden a la zona de arrastre del lecho fluidizado, donde el sólido contenido dentro del lecho fluidizado es transportado por el agente fluidizante fuera del mismo.

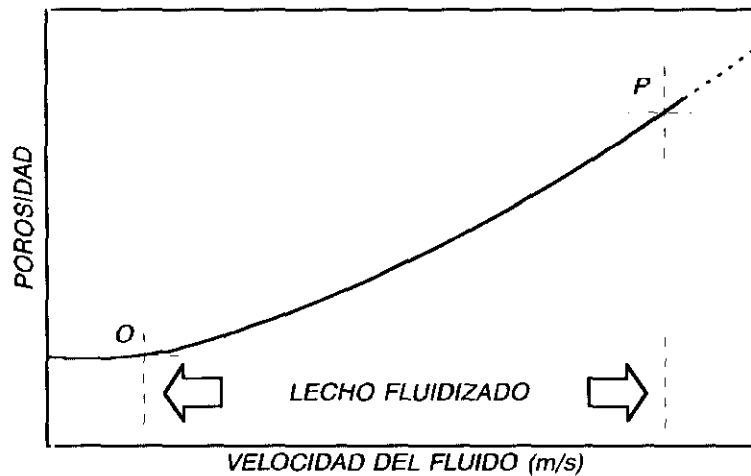


Figura 1.11.-Variación de la porosidad en el paso de lecho fijo a fluidizado

1.3.3.3.- Pérdidas de carga

Se supone, como en el apartado 1.3.3.1., un cilindro vertical, dotado en su parte inferior de un disco con perforaciones por donde se introduce el fluido o medio fluidizante. Cuando se hace circular un fluido a través de un lecho poroso, y se incrementa el caudal del mismo, se alcanza un valor a partir del cual el conjunto de partículas que constituyen el lecho entran en movimiento describiendo trayectorias complejas, que en principio pueden compararse a las trayectorias de las moléculas de los fluidos y aparece el fenómeno de fluidización. Si se sigue aumentando el caudal se termina por alcanzar un valor para el cual todo el lecho de partículas de tamaño y densidad semejante es arrastrado por el fluido, señalado como “inicio de arrastre” en la Figura 1.12.

En la Figura 1.12 se muestra la variación de la pérdida de carga en un lecho con la velocidad superficial del gas en el mismo, definida como el cociente entre el caudal de gas y la superficie



transversal del recipiente. Mientras no aparece el fenómeno de la fluidización, la pérdida de carga (ΔP) con respecto al caudal de fluido introducido presenta una relación casi lineal, (*lecho fijo* en la Figura 1.12). Cuando se inicia el movimiento de las partículas en el lecho, la ΔP decae sensiblemente y permanece oscilando alrededor de un valor constante a medida que sigue aumentando el caudal de fluido (*lecho fluidizado* en la Figura 1.12) (Kunii et al, 1991). Este valor máximo de ΔP es igual al peso de las partículas que constituyen el lecho dividido por su sección transversal.

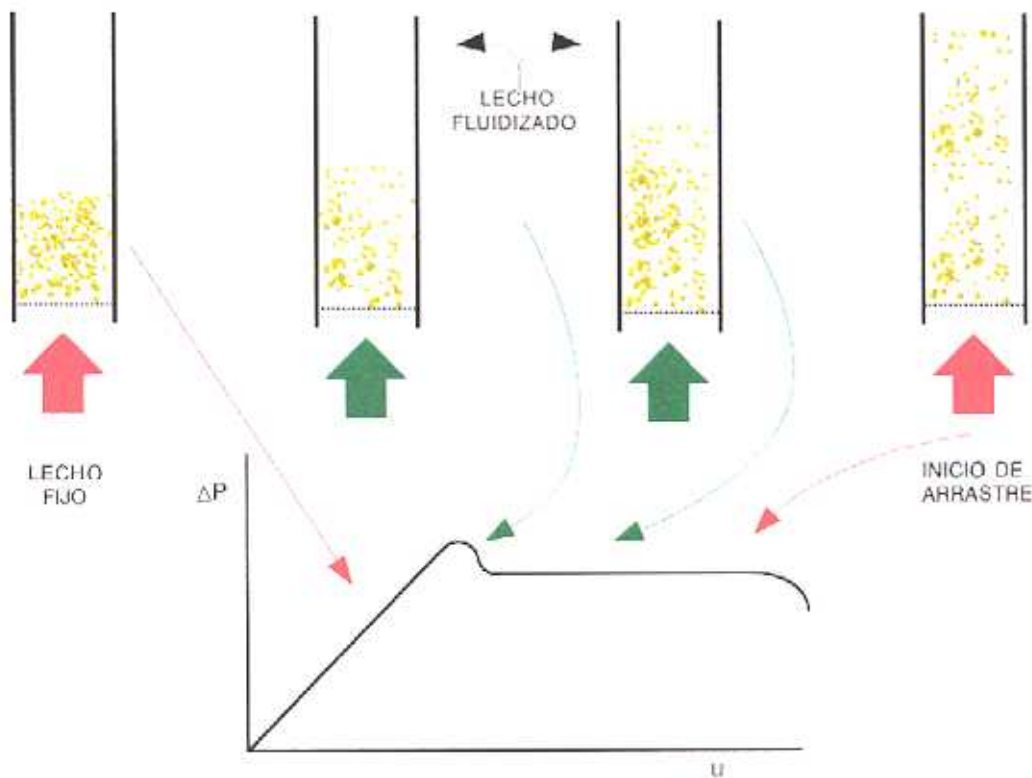


Figura 1.12.-Variación de la pérdida de carga en el paso de lecho fijo a lecho fluidizado

La interpretación del comportamiento del lecho puede hacerse en la forma siguiente: Cuando se supera un valor de ΔP correspondiente al lecho en estado de mínima fluidización, el lecho es sostenido por la corriente del fluido, lo que lleva consigo que las partículas se separen, aumente la porosidad del lecho y disminuya ΔP . Las partículas volverán a formar un lecho como el inicial si se disminuye el caudal de gas. Como consecuencia, entre las situaciones extremas (lecho fijo e inicio de arrastre), el lecho de partículas se mantiene en agitación continua con una porosidad que es función del caudal de



fluido. Cuando se produzca el arrastre el ΔP disminuye drásticamente, ya que el sólido contenido en el lecho disminuye debido al transporte neumático del mismo.

1.3.3.4.- Velocidades de fluidización

Al hacer pasar un fluido a través de un lecho de partículas, hasta que la velocidad del mismo no es suficientemente grande como para sustentarse, el lecho puede considerarse como lecho fijo. Cuando la condición de sustentación se cumple, el lecho se denomina fluidizado (Levenspiel, 1975). Cuando la energía suministrada por el medio fluidizante equilibra exactamente el peso del sólido a tratar, el proceso se considera en un estado de mínima fluidización, y a la velocidad se la denomina velocidad de mínima fluidización. Si se va aumentando la velocidad del medio fluidizante se va produciendo un aumento de la agitación de las partículas que componen el sólido, dicho contacto es característico del lecho fluidizado, durante todo el proceso la porosidad del lecho irá aumentando. Si se continúa aumentando la velocidad del fluido se consigue la velocidad de arrastre o terminal, en la que el sólido es arrastrado por el medio fluidizante. Cualquiera de las velocidades mencionadas anteriormente depende fundamentalmente del diámetro de partícula, de las densidades tanto del sólido como del fluido y de la viscosidad del gas fluidizante.

1.3.3.5.- Distribución de tamaños y segregación

La segregación de las partículas de un lecho en función de la altura está estrechamente relacionada con la distribución de la porosidad en el mismo, esto se muestra en la Figura 1.13, en la que la distribución de tamaños de diferentes fracciones es aproximadamente constante dentro de la zona de porosidad constante de la fase densa, pero que en la parte superior de densidad decreciente, se vuelve progresivamente más rica en finos (azul). Esta tendencia se hace más marcada en la fase diluida. La distribución de gruesos (verde) en la parte superior es inversa a los finos, siendo en este caso, muy marcada la rapidez de disminución en la fase diluida.

Por otra parte, la separación y clasificación mediante lechos fluidizados aprovecha una de las propiedades que le es propia a este tipo de lechos, que es la capacidad de segregar el sólido en función de la densidad y tamaño de partícula.

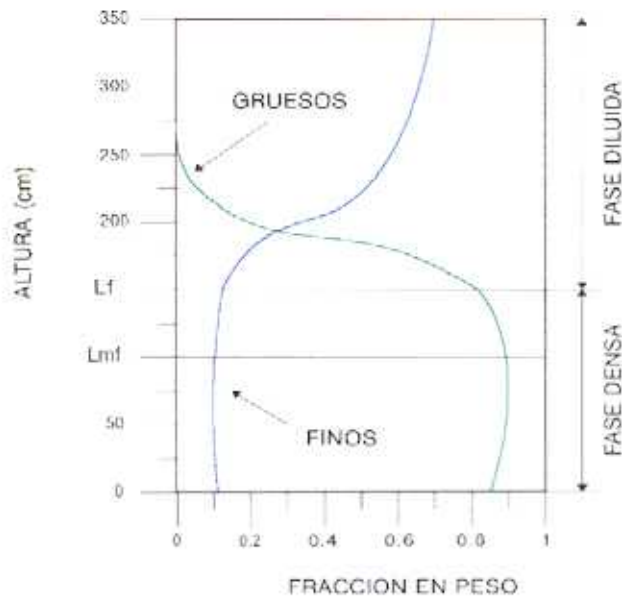


Figura 1.13.- Distribución de tamaños

1.3.3.6.- Tiempos de residencia

En un lecho fluidizado se pueden definir dos tiempos de residencia: del fluido y del sólido contenido dentro del lecho fluidizado:

Tiempo de residencia del fluido: El tipo de flujo real de gas que presenta un lecho fluidizado no es nada sencillo de definir teóricamente (Aznar, 1979), ya que es una combinación de flujo pistón y de mezcla completa con cierta fracción de cortocircuito debido a las burbujas presentes en el lecho fluidizado. Si se considera el sólido de un lecho fluidizado, su flujo es prácticamente de mezcla completa, por lo que al pasar un gas a través del lecho, el gas está en todo momento en contacto con partículas de composición igual a la de salida. El tiempo de contacto o de residencia del gas se puede expresar por:

$$t_g = \frac{\text{Volumen de gas}}{\text{Caudal de gas}} = \frac{A_o \cdot L_o \cdot \varepsilon}{A_o \cdot u_o} = \frac{L_o \cdot \varepsilon}{u_o} \quad (1.5)$$



donde A_0 es la sección del lecho; L_0 es la altura del lecho; u_0 la velocidad superficial del fluido dentro del lecho y ε representa la porosidad.

Si se supone que todas las venas de la corriente de fluido son paralelas y tienen la misma velocidad (flujo pistón), lo cual es de difícil cumplimiento por la presencia de sólido dentro del lecho, la ec. 1.5 indica que para un lecho dado, el tiempo de contacto viene determinado principalmente por la velocidad superficial del fluido, puesto que L_0 y ε no pueden ser modificados en gran medida.

Tiempo de residencia del sólido: En un lecho fluidizado que opera en continuo constantemente salen del mismo un cierto número de partículas, es probable que algunas de las recientemente alimentadas salgan del mismo habiendo residido en el lecho un tiempo menor al tiempo de residencia medio dado por el cociente entre la masa del lecho y el caudal másico de alimentación. Como contrapartida, habrá un número aproximadamente igual de partículas que permanecerán en el sistema más tiempo que el dado por el tiempo medio de residencia. Esto es debido a la elevada turbulencia que tiene lugar dentro del lecho fluidizado donde se produce una mezcla casi instantánea del sólido que a él afluye con el preexistente. Como consecuencia de todo esto, la composición del lecho fluidizado es muy homogénea.

Si consideramos que τ es el tiempo necesario para que cada partícula complete su transformación y t_m es el tiempo medio de residencia del sólido dentro de un lecho fluidizado, es evidente que únicamente se obtendrán conversiones de sólido adecuadas cuando el cociente τ/t_m sea inferior a la unidad.

Considerando la elevada turbulencia que se genera dentro del lecho en estado fluidizado, la mezcla es prácticamente instantánea con lo que la dinámica es de mezcla perfecta. Por todo ello, la fracción de las partículas que residen un tiempo inferior al necesario para su conversión completa dentro de un lecho con mezcla perfecta, viene determinada por la ec. 1.6.

$$\text{Fracción de partículas que han permanecido menos de } \tau \text{ (\%)} = 1 - e^{-\tau/t_m} \quad (1.6)$$



En la tabla 1.10 se muestra el porcentaje de partículas que han permanecido menos de τ en función del cociente de tiempos (τ/t_m):

Tabla 1.10.- Porcentaje de partículas que han permanecido un tiempo menor de τ no transformadas en función del cociente de tiempos (τ/t_m)

τ/t_m	Porcentaje (%)
10	99.9
1	63.2
0.1	9.5
0.01	0.99

Según los datos que se muestran en la tabla 1.10 se puede deducir, desde el punto de vista de la conversión, la conveniencia de que el cociente τ/t_m sea inferior a la unidad para que el número de partículas que sufren la conversión sea el adecuado.

1.3.3.7.- Parámetros que definen al lecho fluidizado

Hay una cierta diversidad de criterios sobre los parámetros que describen a un lecho fluidizado (Aragón, 1976). A continuación se muestran los más relevantes en secaderos de lecho fluidizado y que se utilizan a lo largo de la presente memoria.

- **Tamaño de partícula:** El tamaño de partícula se determina mediante un análisis granulométrico por tamizado; en este caso, el tamaño de cada fracción se define como:

$$dp_i = \sqrt{dp_n \cdot dp_{n+1}} \quad (1.7)$$

donde dp_n y dp_{n+1} son las luces de dos tamices sucesivos. El tamaño medio de la mezcla a analizar (media armónica) se calcula mediante la ec. 1.8:

$$dp = \frac{100}{\sum \frac{W_i}{dp_i}} \quad (1.8)$$



donde W_i es el porcentaje en peso de la fracción retenida en el tamiz n con un tamaño dp_i , dado en la ec. 1.7

- **Velocidades características:** La velocidad de mínima fluidización se obtiene gráficamente a través de diagramas experimentales de pérdida de carga frente a la velocidad lineal del gas similar a la Figura 1.12. Dicho cálculo se lleva a cabo mediante la lectura en el eje de abscisas del punto de corte entre la prolongación del ajuste correspondiente al lecho fijo y la pérdida de carga máxima teórica del lecho en estado fluidizado (cociente entre el peso del lecho y su sección). De igual forma, la velocidad de mínima fluidización se puede calcular teóricamente mediante expresiones derivadas de la ecuación de Ergun (Ergun, 1952). Como ejemplo, se muestra la ecuación de Corella y Otero (Aznar, 1979), ec. 1.9, válida para fluidización con aire en condiciones ambientales:

$$u_{mf} = 159 \cdot \rho_s^{0.87} \cdot dp^{1.76} \quad (1.9)$$

Al cociente entre la velocidad lineal del gas en el tubo vacío y la velocidad de mínima fluidización se denomina velocidad reducida de trabajo, u_R .

- **Expansión del lecho:** La expansión del lecho se traduce en un aumento de la altura del lecho respecto a las condiciones que presenta en el estado de mínima fluidización. Viene definida por la ecuación:

$$\Delta H_L = \frac{H_f - H_{mf}}{H_f} \quad (1.10)$$

Así pues, la expansión puede calcularse a través de medidas de alturas del lecho, en condiciones de mínima fluidización (H_{mf}) y en las condiciones de trabajo (H_f).



1.3.4.- Lecho fluidizado/móvil

Cabe destacar otro tipo de contactor que es el contactor compuesto de un lecho fluidizado y un lecho móvil en serie (fluidizado/móvil). Como ya se ha explicado por una parte el flujo es de mezcla perfecta dentro del lecho fluidizado y de flujo pistón dentro del lecho móvil. El diseño del contactor tiene por objeto disponer de las múltiples ventajas y evitar los defectos que presentan el lecho fluidizado y el lecho móvil por separado.

Una de las ventajas principales de los lechos móviles con una velocidad de desplazamiento adecuada (Aznar, 1979), es la capacidad que tienen éstos de producir conversiones muy altas. Por otro lado, y como defecto de este tipo de lechos, cabe destacar los gradientes térmicos que se forman en su seno. En cuanto a los lechos fluidizados, la temperatura es homogénea y se puede considerar que todo el lecho es isoterma.

El tipo de contactor de lecho fluidizado/móvil consiste en un sistema compuesto por un lecho fluidizado y un lecho móvil en serie, donde el sólido contenido en éste, desciende por acción de la gravedad, como se muestra en la Figura 1.14.

Como características destacables de este tipo de contactor cabe señalar:

1. Los perfiles de propiedades tales como la humedad y temperatura del sólido y del aire, con la altura de sólido dentro del lecho móvil, adecuan al sólido para ser tratado posteriormente dentro del lecho fluidizado generando un sólido, que en estado estacionario, proporciona al lecho fluidizado un sólido de propiedades (humedad, granulometría, etc.) adecuadas.
2. Si dicho contactor se utilizara como reactor químico, presentaría conversiones del gas muy altas ya que el fluido, que en un principio sirve como medio fluidizante además de como reactivo, termina de reaccionar dentro del lecho móvil.
3. En el caso de tratar sólidos termosensibles, dado el tipo de flujo desarrollado en este contactor, pueden ser tratados a temperaturas inferiores de las habituales en otros reactores. Además el aporte energético del fluido caliente sobre el sólido a tratar es gradual. Según se observa en la Figura 1.14, el sólido es alimentado a través del lecho móvil a la temperatura ambiente, dicho sólido se calienta progresivamente según desciende en el lecho móvil, por medio del aire caliente introducido por la base del



contactor, hasta que es alimentado al lecho fluidizado donde se alcanza la mayor temperatura del proceso. Este aporte energético gradual produce una menor incidencia térmica sobre el sólido a tratar.

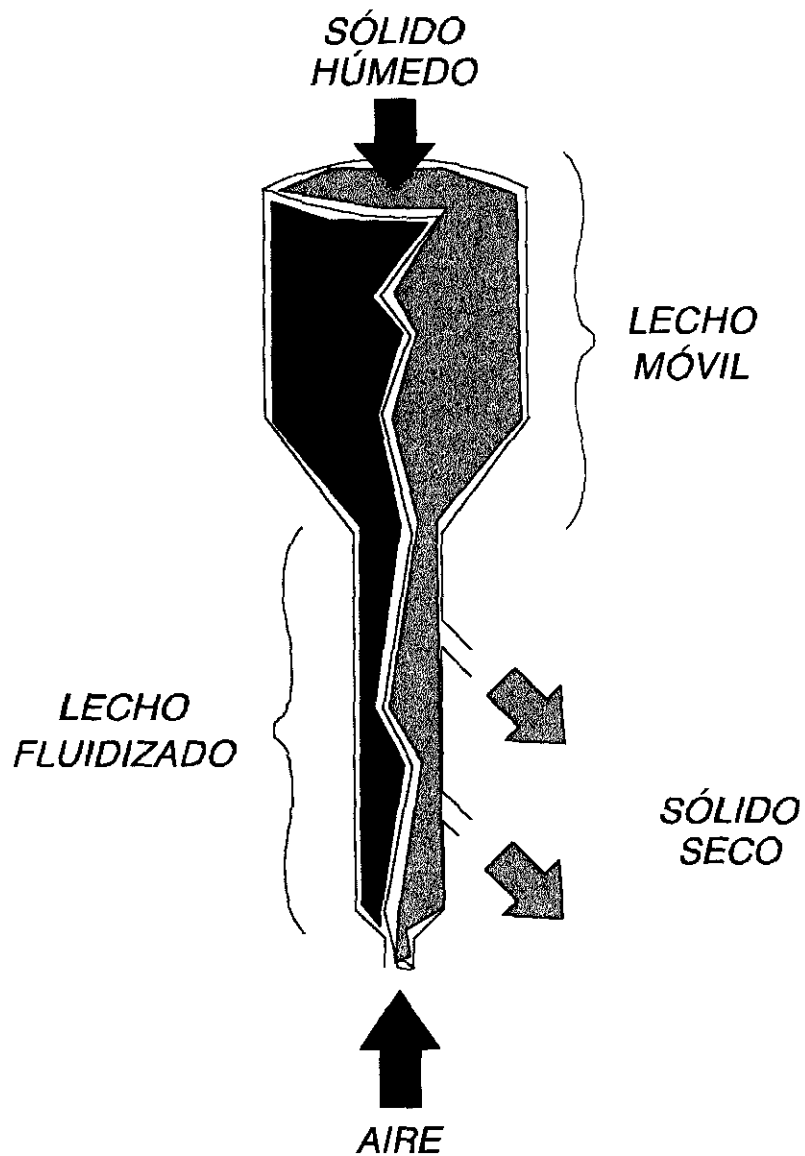


Figura 1.14.- Contactor compuesto por un lecho fluidizado y móvil en serie (Contactor fluidizado/móvil).



1.3.5.- Modelos de secadero de lecho fluidizado

El secado de materiales granulares en lechos fluidizados está siendo ampliamente utilizado en la industria química, y alimentaria ya que este sistema de secado presenta grandes ventajas sobre otros sistemas basados de igual forma en el contacto gas-sólido. En los lechos fluidizados el intercambio de calor y materia dentro del mismo es muy elevado de igual forma el intercambio de calor entre el sólido y superficies introducidas en el mismo es elevado ya que dentro del lecho existe un alto grado de mezcla motivando éste una ausencia de gradientes de temperaturas dentro del mismo, como ya se ha mencionado. Estos factores permiten reducir el tiempo de tratamiento además de la temperatura de operación requerida para el secado de sólidos, evitando la formación de puntos calientes dentro del propio lecho fluidizado, facilitando el transporte del sólido a través de todo el sistema de secado.

La modelización de un secadero basado en lechos fluidizados ha sido estudiada profundamente en las últimas cuatro décadas, una revisión bibliográfica sobre el tema se puede encontrar en (Panda y Rao, 1991).

Los modelos propuestos están basados en el balance energético y de materia para el sistema con determinadas simplificaciones de cada caso particular. Las principales simplificaciones que se suelen realizar se pueden resumir en: temperatura de operación dentro del lecho se puede considerar uniforme, el medio fluidizante en el lecho fluidizado y a la salida del mismo están en equilibrio térmico y químico con el lecho, además de que las propiedades de dicho gas son uniformes dentro del lecho (Viswanathan, 1986). Los modelos más simples pueden ser válidos bajo determinadas condiciones de operación, pero no son adecuadas para cualquier aplicación (Lai et al., 1986).

Algunos modelos están basado en la teoría de dos fases (Lai et al., 1986; Donsí y Ferrari, 1992), en la cual se considera que el gas fluye a través del lecho en dos fases denominadas *emulsión* y *burbujas* con una transferencia de materia y de energía entre ellas, los modelos basados en estas condiciones tienen una gran aplicabilidad en el terreno de la modelización. Sin embargo, presentan un gran problema que es el gran número de parámetros que son necesarios para su modelización matemática, tales como: datos geométricos del recipiente, propiedades de las partículas sólidas y del gas empleado. Panda y Rao, (Panda y Rao, 1991) presentaron una revisión de métodos experimentales y teóricos de estimación de los parámetros necesarios para la aplicación de este tipo de modelos, pero en la mayoría de los casos uno o varios de dichos parámetros son de difícil cálculo



o medida o sólo pueden ser estimados aproximadamente. Existen modelos más elaborados, entre los que cabe destacar los modelos de tres fases (Hoebink y Rietema, 1980; Panda y Rao, 1993; Palánz, 1983; Zahed et al., 1995), en los cuales se considera que el proceso de transferencia de materia o de energía dentro del secadero fluidizado están bien definidos dentro de la fase diluida (burbujas), una fase constituida por los intersticios de la fase de sólido y gas. Al igual que el modelo anterior, el número de parámetros es muy elevado de lo que se deriva la gran dificultad de aplicar dicho modelo a sistemas reales.

Debido a las dificultades encontradas en los modelos citados anteriormente, se ha propuesto el uso de redes neuronales artificiales, un nuevo tipo de algoritmos que han sido usados en los últimos años para problemas similares de modelización y control (Palancar et al., 1998). Los modelos basados en redes neuronales artificiales pertenecen a la clase llamada “modelos de caja negra” debido a que ellos no requieren un conocimiento químico y/o físico profundo acerca del proceso o sistema a modelar. Una red neuronal artificial es un algoritmo que computa una serie de datos de salida a partir de una serie de datos de entrada. La principal diferencia con respecto a otros algoritmos que utilizan datos de entrada/salida es que la red neuronal tiene la capacidad de “aprender” de información en forma de datos de entrada/salida dentro del proceso de aprendizaje. Un adecuado proceso de aprendizaje de la red confiere a ésta la capacidad de predecir datos de salida a partir de datos de entrada nunca vistos anteriormente. Las redes neuronales presentan las siguientes ventajas (Bhat y McAvoy, 1990; Hosking y Himmelblau, 1988 ; Thibault y Grandjean, 1991):

- La estructura es relativamente simple y con conexiones en paralelo, esto significa que el tiempo de cálculo requerido por el ordenador es corto y además, la capacidad de adaptación al problema a tratar es alta, por lo que son adecuados para modelizar sistemas no lineales.
- Es capaz de utilizar aprendizajes pasados para la predicción mediante la interpolación, es decir, es capaz de “aprender” de la experiencia anteriormente mostrada.
- La red neuronal directa es fácilmente invertible para aplicaciones relativas a sistemas de control.



- La implementación de las redes se puede realizar en tarjetas por medio de circuitos integrados. Dichas aplicaciones pueden llevarse a cabo en operaciones reales con bajos costes.

El uso de redes neuronales para la modelización de secaderos es escaso. Dos ejemplos de aplicación de las redes neuronales en el campo del secado son mostrados en (Trelea et al, 1995), en el cual una red neuronal es usada para expresar la cinética de secado y predice la calidad de secado de maíz en granos, y en (Jinescu y Lauric, 1995) que trata el modelado de un secadero en lecho fijo para ácido sebácico en granos de pequeño diámetro de partícula. A partir de los resultados de estos trabajos (Trelea et al, 1995) y (Huang y Mujumdar, 1993), puede ser considerada la importancia de la topología de la red, la función de transferencia usada así como el algoritmo utilizado, dentro de la red neuronal, con fines predictivos del proceso a modelizar.



1.4.- ASPECTOS GENERALES DE LAS REDES NEURONALES

1.4.1.- *Redes neuronales naturales*

Las redes neuronales (Neural Network, NN) se basan en modelos matemáticos que presentan un comportamiento semejante al de las neuronas del cerebro (Hilera y Martínez, 1995). La descripción del comportamiento de una neurona natural puede ayudar a la comprensión de estos modelos matemáticos. Básicamente, dicho comportamiento consiste en la excitación de la célula por agentes externos a ella, la suma de efectos de distinto signo en su interior y la expresión del resultado en forma de impulso eléctrico de salida. La Figura 1.15 muestra los componentes principales de una neurona, célula nerviosa típica perteneciente al sistema nervioso central. La membrana de la neurona separa el plasma intracelular del fluido intersticial que se encuentra fuera de la célula y que contiene iones potasio, cloro, sodio e iones orgánicos negativos. La membrana es permeable a ciertas especies iónicas, y actúa de forma que se mantenga una diferencia de potencial entre el fluido intracelular y el fluido extracelular. Este efecto se consigue mediante la acción denominada de bomba de sodio-potasio.

El funcionamiento de la bomba de sodio-potasio es el siguiente: todas las especies iónicas se pueden difundir a través de la membrana celular con la excepción de los iones orgánicos, que son demasiado grandes. Dado que los iones orgánicos no pueden salir de la célula por difusión, su carga negativa neta dificulta la entrada en la célula de iones de cloro por difusión; por tanto, habrá una concentración más alta de iones cloro fuera de la célula. Además, la membrana celular es selectivamente más permeable para los iones potasio que para los iones sodio; una alta concentración de potasio en el interior de la célula tiende a hacer que los iones de potasio salgan de ella por difusión, pero por otro lado la fuerte atracción de los iones orgánicos negativos tiende a mantener dentro al potasio. El resultado de estas fuerzas opuestas es que se alcanza un equilibrio en el cual hay más iones sodio y cloro fuera de la célula, y más iones de potasio dentro de ella, Figura 1.16. El equilibrio resultante produce una diferencia de potencial a través de la membrana de la célula de unos 70 a 100 mV. Este potencial se denomina potencial de reposo de la célula.

Dentro de una misma neurona existen varias conexiones de entrada con potenciales distintos, Figura 1.15. El axón tiene una cubierta que se denomina vaina de mielina, capa aislante que es interrumpida en varios puntos por los nodos de Ranvier. Las entradas excitatorias que llegan a la célula a través de distintas dendritas reducen las diferencias de potencial locales que existen entre los dos lados



de la membrana celular. La despolarización resultante altera la permeabilidad de la membrana celular a efectos del sodio. Estos cambios generan un flujo iónico entrante que da lugar a que las vesículas que contienen los neurotransmisores se fundan con la membrana sináptica y liberen sus neurotransmisores, que se difunden a través de la unión y se unen a la membrana postsináptica en ciertos lugares llamados receptores. Este flujo entrante de especies iónicas hacia la célula tenderá a despolarizar el potencial de reposo; este efecto es excitatorio. Si entran iones negativos, se producirá un efecto hiperpolarizante; este efecto es inhibitorio. Estos dos efectos son locales, actúan tan sólo a lo largo de una pequeña distancia hacia el interior de la célula y se suman en el montículo del axón. Si la suma es mayor que un cierto valor umbral se genera un potencial de acción.

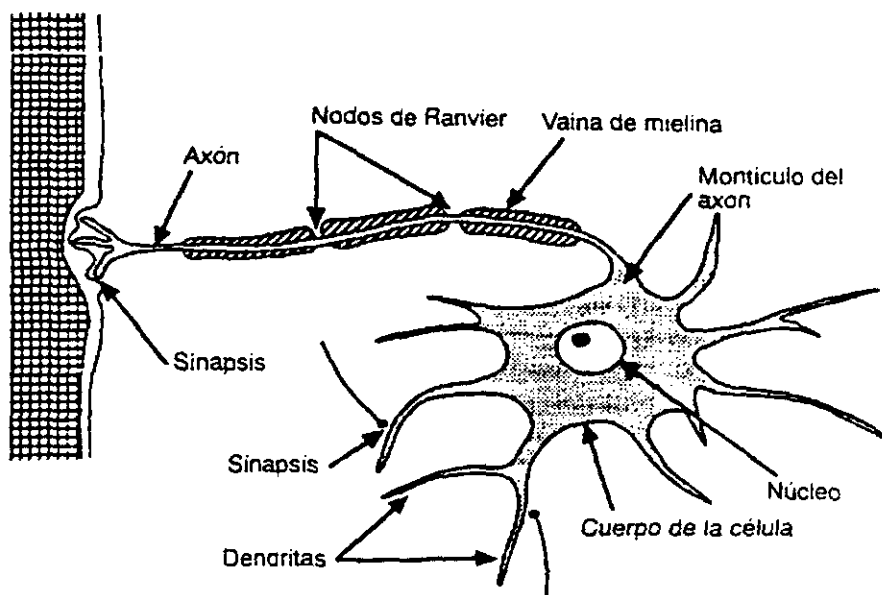


Figura 1.15.-Estructura fundamental de una célula nerviosa típica

Las fibras nerviosas en sí son malos conductores. La transmisión del potencial de acción a lo largo del axón es el resultado de una serie de despolarizaciones que tienen lugar en los nodos de Ranvier. Cuando uno de los nodos se despolariza, se desencadena la despolarización del siguiente nodo. El potencial viaja a lo largo de la fibra en forma discontinua, de un nodo a otro. Una vez que un



potencial de acción ha pasado por un cierto punto ese punto no puede volver a ser excitado durante un milisegundo que es el tiempo que tarda en volver a su potencial de reposo. Este período refractario limita la frecuencia de transmisión de los impulsos nerviosos.

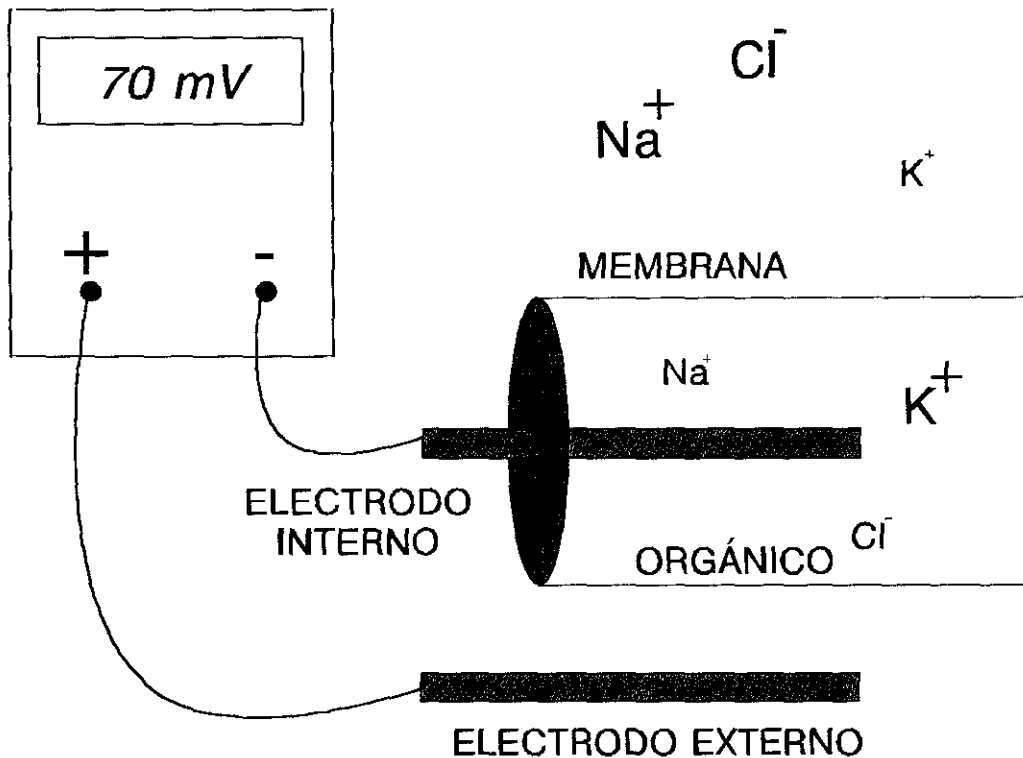


Figura 1.16.-Potencial de reposo existente a ambos lados de la membrana de una neurona

1.4.2.- Redes neuronales artificiales

Una red neuronal artificial intenta simular el mismo comportamiento de una neurona natural. Como se ha descrito en el apartado anterior, dicho comportamiento consiste en sumar determinadas señales de entrada a la célula y expresar un efecto global de salida. El componente básico de una red neuronal artificial es la neurona, que es un pequeño centro de cálculo que transforma varias señales de entrada en una única señal de salida. Las entradas pueden proceder bien de otras neuronas o bien del exterior. Cada entrada se encuentra modulada por un factor denominado peso (W_{ij}), que afecta a la intensidad de la conexión entre la neurona receptora y la emisora; la salida de cada neurona puede transmitirse a otras neuronas o ser una de las señales de salida de la red.



Una neurona tiene un conjunto elemental de instrucciones que es bastante limitado. El cálculo se puede dividir en dos pasos bien diferenciados, como se muestra en la Figura 1.17. El primer paso es la suma ponderada por los pesos respectivos de las entradas. Esta suma se denomina función de activación, y constituye la entrada neta a la neurona. El segundo paso es una transformación de la suma anterior en un nuevo valor; esta transformación se realiza mediante una función de transferencia. Las funciones de transferencia más utilizadas son: función escalón, lineal, sigmoide o arcotangente hiperbólica. A modo de ejemplo aclaratorio, tomando como base el esquema de la Figura 1.17, si $X = 0,5$ e $Y = 0,1$, la función de activación sería simplemente $0,5 + 0,1 = 0,6$; utilizando como función de transferencia la sigmoide, $Z(u) = \frac{1}{(1 + e^{-u})}$, la salida Z para la función de activación $0,6$ sería:

$$Z = \frac{1}{1 + e^{-0.6}} = 0.65 \quad (1.11)$$

Aparte del comportamiento individual de los elementos (neuronas) de la red, hay que especificar la distribución y el interconexionado existente entre ellos. Normalmente la red se ordena en varias capas de neuronas, Figura 1.18. Cada una de las capas tiene un conjunto de neuronas de comportamiento similar; el número de neuronas en cada capa no tiene por qué ser el mismo. Al conjunto de pesos que ponderan las conexiones entre las distintas neuronas se denomina matriz de pesos. En la Figura 1.18. se muestra una red neuronal con una capa de entrada de datos, varias capas ocultas intermedias y una capa de salida de resultados. Se indican también las conexiones entre neuronas.

La principal característica de una red neuronal es su capacidad de "aprender". El proceso de aprendizaje se realiza presentando a la red una muestra patrón de pares de valores de entrada/salida. Durante el proceso de aprendizaje, la red modifica sus parámetros (matriz de pesos) adaptándolos hasta conseguir un conjunto de valores de los pesos que sea capaz de reproducir la muestra. El algoritmo conseguido, red adiestrada, representa una forma de asociación entre patrones de entrada y de salida. Como resultado, la red será capaz de generalizar problemas, es decir, será capaz de generar salidas adecuadas ante nuevas entradas, similares a las aprendidas pero nunca vistas antes.

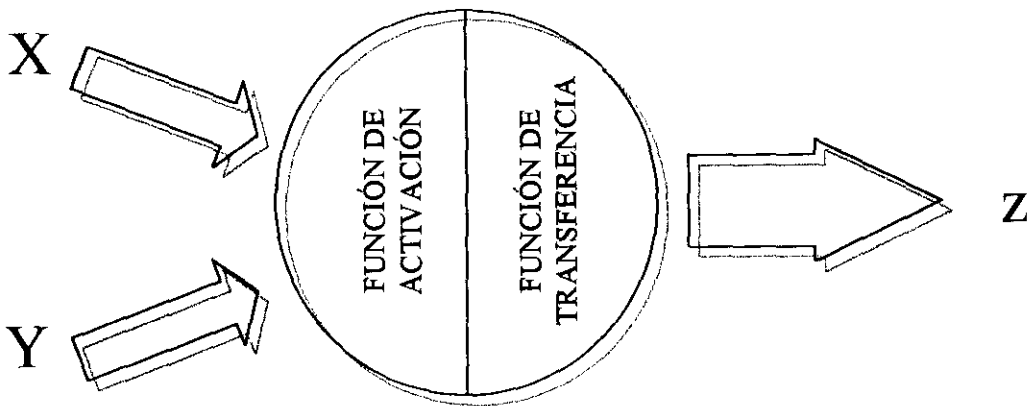


Figura 1.17.- Etapas de cálculo en una neurona artificial

Existen cuatro aspectos que caracterizan una red neuronal: su topología, el mecanismo de aprendizaje, el tipo de asociación realizada entre la información de entrada y de salida y la forma de representación de estas informaciones. La combinación de estos cuatro aspectos da lugar a una gran cantidad de tipos de redes neuronales en función de la utilidad requerida para ellas. En la Tabla 1.11 se resumen los tipos de redes más conocidos, las aplicaciones más importantes de cada una, sus ventajas e inconvenientes y quién o quiénes fueron sus creadores.

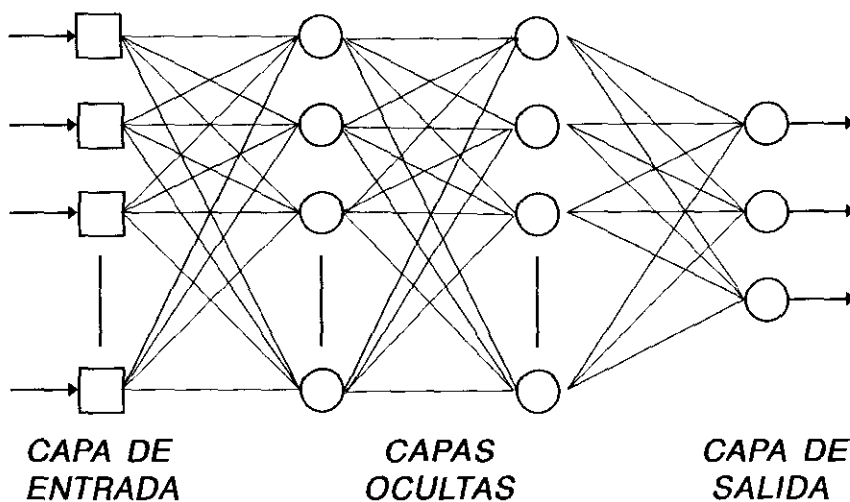


Figura 1.18.- Red neuronal artificial con múltiples capas ocultas



A partir de 1986 se produce un aumento de interés sobre la utilidad y aplicabilidad de este tipo de redes en muy diversos campos: modelización, clasificación de patrones (escritura, voz, imagen), control de procesos, predicción y diagnóstico de fallos, etc.

Tabla 1.11.- Clasificación histórica de las redes neuronales artificiales (Hilera y Martínez, 1995)

<u>TIPO DE RED</u>	<u>AÑO</u>	<u>APLICACIONES</u>	<u>COMENTARIOS</u>	<u>LIMITACIONES</u>	<u>AUTORES</u>
PERCEPTRON	1958	RECONOCIMIENTO DE CARACTERES IMPRESOS	LA RED MÁS ANTIGUA	NO PUEDE RECONOCER CARACTERES COMPLEJOS	F. ROSENBLATT
ADALINE/MADALINE	1960	FILTRADO DE SEÑALES ECUALIZADOR ADAPTIVO	RÁPIDA, FÁCIL DE INTERPRETAR CON CIRCUITOS ANALÓGICOS	SOLO ES POSIBLE CLASIFICAR ESPACIOS LINEALMENTE SEPARADOS	B. WIDROW
AVALANCHA	1967	RECONOCIMIENTO DEL HABLA CONTROL BRAZO ROBOT	NINGUNA RED SENCILLA PUEDE HACER TODO ESTO	NO ES FÁCIL ALTERAR LA VELOCIDAD O INTERPOLAR EL MOVIMIENTO	S. GROSSBERG
CEREBELLATRON	1969	CONTROL DE MOVIMIENTO DE LOS BRAZOS DE UN ROBOT	SEMEJANTE A AVALANCHA	REQUIERE COMPLICADAS ENTRADAS DE CONTROL	D. MARR J. ALBUS
BACKPROPAGATION	1974-85	SÍNTESIS DE VOZ, CONTROL DE ROBOT, PREDICCIÓN	FACILIDAD DE APRENDIZAJE POTENTE GRAN CANTIDAD DE APLICACIONES	NECESITA MUCHO TIEMPO PARA EL APRENDIZAJE Y MUCHOS EJEMPLOS	P. WERBOS D. PARKER D. RUMELHART
BRAIN-STATE-BOX	1977	EXTRACCIÓN DE CONOCIMIENTO DE BASE DE DATOS	MEJOR REALIZACIÓN QUE LAS REDES DE HOPFIELD	APLICACIONES NO ESTUDIADAS TOTALMENTE	J. ANDERSON
NEOCOGNITRON	1978-84	RECONOCIMIENTO DE CARACTERES MANUSCRITOS	INSENSIBLE A LA TRASLACIÓN ROTACIÓN Y ESCALA	REQUIERE MUCHOS ELEMENTOS DE PROCESO, NIVELES Y CONEXIONES	K. FUKUSHIMA
SELF-ORGANIZING-MAP (MOP) TOPOLOGY-PRESERVING MAO (TPM)	1980-84	RECONOCIMIENTO DE PATRONES CODIFICACIÓN DE DATOS, OPTIMAC.	REALIZA MAPAS DE CARACTERÍSTICAS COMUNES DE LOS DATOS APRENDIDOS	REQUIERE MUCHO ENTRENAMIENTO	T. KOHONEN
HOPFIELD	1982	RECONSTRUCCIÓN DE PATRONES OPTIMIZACIÓN	FÁCIL DE CONCEPTUALIZAR	CAPACIDAD Y ESTABILIDAD	J. HOPFIELD



Tabla 1.11.- Continuación

<u>TIPO DE RED</u>	<u>AÑO</u>	<u>APLICACIONES</u>	<u>COMENTARIOS</u>	<u>LIMITACIONES</u>	<u>AUTORES</u>
MEMORIA ASOCIATIVA BIDIRECCIONAL	1985	MEMORIA HETEROASOCIATIVA	APRENDIZAJE Y ARQUITECTURA SIMPLE	BAJA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO LOS DATOS DEBEN SER CODIFICADOS	B. KOSKO
MAQUINAS DE BOLTSMAN Y CAUCHY	1985-86	RECONOCIMIENTO DE PATRONES (IMÁGENES SONAR Y RADAR)	REDES SIMPLES, CAPACIDAD DE REPRESENTACIÓN ÓPTIMA DE PATRONES	TIEMPO LARGO DE APRENDIZAJE	J. HINTON T. SEJNOWSKI
TEORÍA DE RESONANCIA ADAPTIVA (ART)	1986	RECONOCIMIENTO DE PATRONES (RADAR, SONAR, ETC.)	SOFISTICADA POCO UTILIZADA	SENSIBLE A LA TRASLACIÓN, DISTORSIÓN Y ESCALA	G. CARPENTER S. GROSSBERG
COUNTER-PROPAGATION	1986	COMPRESIÓN DE IMÁGENES	COMBINACIÓN DE PERCEPTRON Y TPM	NUMEROSAS NEURONAS Y CONEXIONES	R. HECTNIELSEN

1.4.2.1.- Perceptrón multicapa

El perceptrón fue el primer modelo de red neuronal artificial (Rosembat, 1988). Despertó un enorme interés en los años 60 debido a su capacidad de aprender a reconocer patrones sencillos. El perceptrón más sencillo está formado por varias neuronas de entrada y una neurona de salida que es capaz de decidir cuándo el conjunto de valores de entrada presentados a la red pertenece a una de dos posibles respuestas.

La única neurona de salida del perceptrón que se muestra en la Figura 1.17 realiza la suma ponderada de las entradas y pasa el resultado a una función de transferencia de tipo escalón. La regla de decisión es responder +1 si el patrón presentado pertenece a una de las clases, o -1 si el patrón pertenece a la otra. La salida dependerá de la entrada neta y del valor umbral.

Por ejemplo, sea una neurona con dos entradas (perceptrón) cada una de las cuales puede tomar los valores 0 o 1. Esta neurona puede simular y distinguir funciones lógicas entre las que cabe destacar la función OR, es decir, clasificar en dos grupos las diferentes combinaciones de sus variables de entrada según el esquema que se muestra en la tabla 1.12. La función OR, se muestra gráficamente en la Figura 1.19 (a) y analíticamente en la tabla 1.12. En la representación gráfica de dicha función los valores de las variables X e Y, cuyos únicos valores son 0 y 1, se representan en los ejes



perpendiculares; el valor respuesta de la neurona tendrá una representación puntual en el plano XY. Según el tipo de entrada, todas las salidas se pueden agrupar en dos semiplanos, separados por la línea AA'. Así, las entradas 0-1, 1-0 y 1-1 quedan en el semiplano superior y la entrada 0-0 en el inferior.

Tabla 1.12.-Redes que simulan las funciones OR y XOR

ENTRADAS AL PERCEPTRON		SALIDAS DEL PERCEPTRON	
X	Y	OR	XOR
0	1	1	1
0	0	0	0
1	1	1	0
1	0	1	1

La función OR es lineal, es simulable por medio de un perceptrón monocapa, debido a que se puede trazar una recta que separe los puntos en dos regiones bien diferenciadas. Sin embargo, no se pueden separar mediante una recta en dos regiones diferentes las salidas de la *función XOR*. Esta función se diferencia de la OR en su esquema de clasificación, como se indica en la Figura 1.19.(b) y en la tabla 1.12. Esta función es no lineal, y para resolver su simulación se necesita una red de mayor número de capas; una red con dos capas puede ser suficiente para separar la función XOR en dos regiones homogéneas (AA' y BB' en la Figura 1.19.(b)) lo que significaría que redes de dos capas solucionan funciones no lineales.

Un perceptrón multicapa, Figura 1.18, es una red de tipo "feedforward", compuesta por varias capas y un nivel de entrada. El *perceptrón multicapa* básico es de dos capas, una capa interna (oculta) y otra de salida. Esta red permite establecer regiones de decisión mucho más complejas que las de dos semiplanos, como hace el perceptrón de una sola capa.

Una técnica utilizada para analizar el comportamiento de redes multicapa es representar en un mapa las regiones de decisión creadas en el espacio multidimensional de entradas a la red. En estas regiones se visualiza qué patrones pertenecen a una clase y cuáles a otra. El perceptrón multicapa separa



las regiones por un hiperplano cuya ecuación queda determinada por los pesos de las conexiones y la función de activación de la neurona. Es este caso, los valores de los pesos pueden fijarse o adaptarse utilizando diferentes algoritmos de entrenamiento de la red.

Según el teorema de Cybenko (Cybenko, 1988) se puede demostrar que cualquier problema no lineal puede resolverse con una estructura de red de dos capas. La red neuronal de dos capas tiene un primer nivel, nivel de entrada, que recibe los estímulos procedentes del exterior. La segunda capa, capa oculta, elabora relaciones en función de los datos de entrada. La tercera capa, capa de salida, produce una respuesta como resultado de una elaboración de los datos de entrada y los de la capa oculta. Las dos últimas capas son los centros de cálculo; el primer nivel únicamente recibe datos procedentes del exterior.

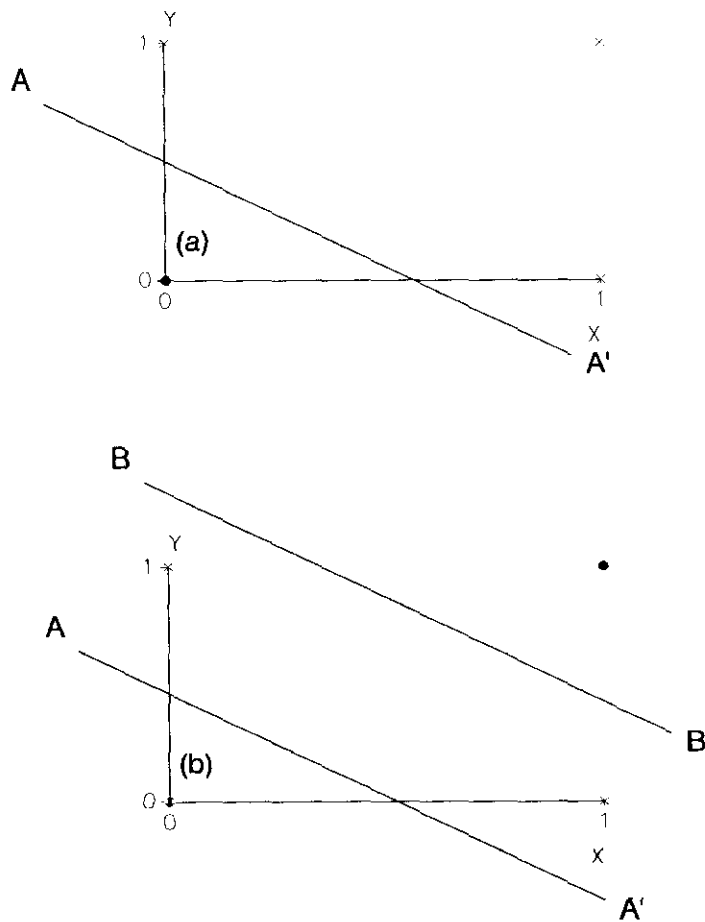


Figura 1.19.-Funciones OR y XOR



Cada capa está compuesta por nodos o neuronas. Existen conexiones entre una capa y otra mediante la unión de las neuronas que componen los niveles. En la Figura 1.20 se representa una red de este tipo, similar a la que se ha utilizado en el presente trabajo. Cada una de estas conexiones están caracterizadas por los *pesos* que son simplemente números reales por los que se multiplica la salida de una neurona. El resultado es el valor de entrada a la neurona de la siguiente capa.

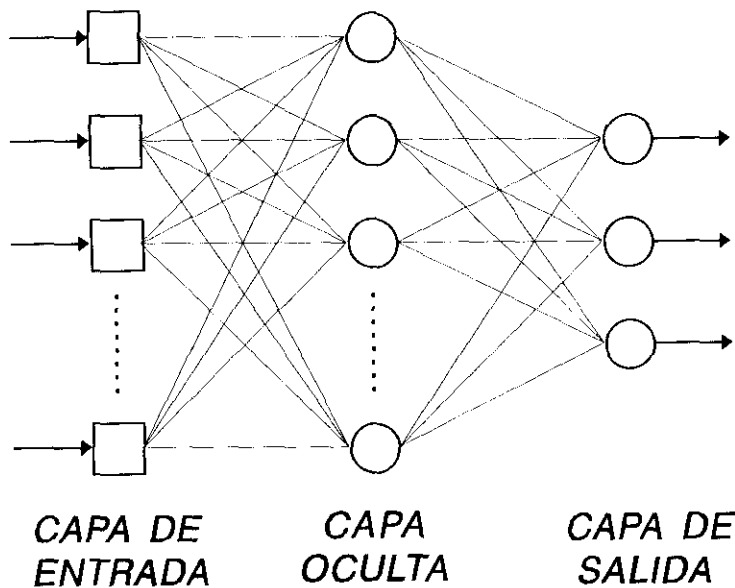


Figura 1.20.-Perceptron multicapa (tres capas)

En la nomenclatura utilizada se ha llamado i al nivel de entrada y j , k a las diferentes capas de la red, oculta y de salida, respectivamente. Se hace uso de estas letras como subíndices de U , valor que llega a cada capa y de los pesos, W_{ij} . Se llaman a , b y c al número total de neuronas en i , j y k , respectivamente.

1.4.2.1.1.- Elaboración de la información

La información suministrada a la red para su aprendizaje debe estar compuesta por conjuntos de datos de entrada y salida. El aprendizaje de una red neuronal es básicamente un proceso iterativo en el que se minimiza una función del error de predicción, es decir, la diferencia entre el valor predicho y el



valor real. En dicha minimización se pueden emplear diferentes funciones del error de predicción. El más utilizado es el cuadrado del error, dado por la expresión.

$$E = \frac{1}{2} \sum (y - d)^2 \quad (1.12)$$

donde "y" representa el valor de salida de la red y "d" el valor de salida deseado para el correspondiente valor de entrada.

Por la estrategia de aprendizaje, las redes neuronales se pueden clasificar según el esquema que se muestra en la Tabla 1.13.

Tabla 1.13.- Clasificación de las redes neuronales según el tipo de aprendizaje

TIPOS DE REDES NEURONALES	APRENDIZAJE SUPERVISADO	APRENDIZAJE POR CORRECCIÓN DEL ERROR	PERCEPTRON MULTICAPA
		APRENDIZAJE POR REFUERZO	ASOCIATIVA
		APRENDIZAJE ESTOCÁSTICO	MAQ. DE BOLTMAN Y CAUCHY
	APRENDIZAJE NO SUPERVISADO	APRENDIZAJE HEBBIANO	HOPFIELD
		APRENDIZAJE COMPETITIVO	NEOCOGNITRON

Los dos mecanismos principales de aprendizaje, supervisado y no supervisado, se diferencian fundamentalmente en que en el aprendizaje supervisado se conoce el error de predicción, ya que se conocen los valores de predicción y los reales; en el aprendizaje no supervisado el error de predicción es desconocido puesto que no se conocen los datos reales.



En el funcionamiento de una red neuronal artificial, el recorrido de la información desde la entrada hasta la capa de salida pasa a través de varias etapas:

Función de Activación: La información suministrada al nivel de entrada de la red se transfiere a la segunda capa mediante pesos que describen la intensidad de cada unión neurona-neurona. Para calcular la entrada de la segunda capa se emplea la siguiente relación:

$$A_b = \sum_a W_{ab} U_{ia} \quad (1.13)$$

donde A_b es la función de activación de la neurona b , W_{ab} los pesos de unión del primer nivel con cada neurona de la segunda capa y U_{ia} cada una de las entradas al nivel de entrada.

Según la ec. 1.13, la función de activación A_b es el resultado de sumar todos los productos de las señales de la primera capa por los pesos respectivos de conexión. Por tanto la ec. 1.13 se podría entender como una operación similar al producto de dos matrices.

La función de transferencia suministra una salida por cada neurona en función de su entrada, más concretamente en función del valor de activación. La función de transferencia más utilizada en redes neuronales es la función sigmoide que, para una neurona, viene dada por:

$$U_{kb} = \frac{1}{1 + e^{-A_b}} \quad (1.14)$$

Esta función de transferencia genera valores en el intervalo $[0, 1]$. La función de salida se calcula por la curva sigmoide, como se muestra en la Figura 1.21., donde se muestra también la derivada de la curva sigmoide.

Otra función de transferencia utilizada frecuentemente es la función tangente hiperbólica, definida como:



$$U_{\dot{u}} = \frac{e^{A_b} - e^{-A_b}}{e^{A_b} + e^{-A_b}} \quad (1.15)$$

En esta función de transferencia, U_{k_b} es proporcional a A_b , ya que U_{k_b} es la ordenada en el origen de la curva definida por la tangente hiperbólica. Esta función de transferencia genera valores dentro de un intervalo $[-1, 1]$.

Existen otras funciones de transferencia, como la función escalón, rampa, etc. en las que U_{k_b} varía discontinua o linealmente con respecto a A_b . Una parte fundamental dentro del proceso de optimización de pesos, es la obtención de la derivada de la función de transferencia, para lo cual se necesita que ésta sea una función continua y derivable. Esto limita la utilización de determinadas funciones de transferencia (como escalón) en problemas marcadamente no lineales y variables con el tiempo, en cuyo caso es preciso usar funciones de tipo sigmoide o de tangente hiperbólica.

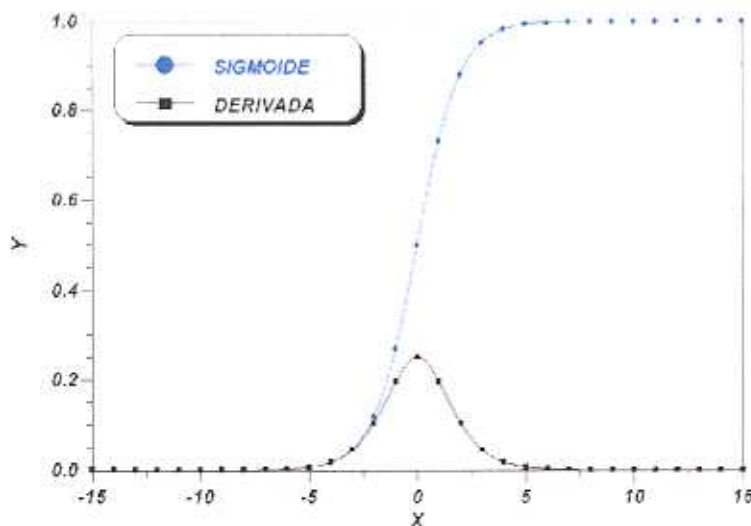


Figura 1.21.- Función sigmoide y su derivada



1.4.2.1.2.-Optimación de la red

Para la correcta utilización de una red se debe optimar: la arquitectura de la red, el coeficiente de aprendizaje (μ), los pesos y el tamaño de las muestras de aprendizaje:

Arquitectura de la red: Según el teorema de Cybenko (Cybenko, 1988) se demuestra que cualquier problema no lineal se puede resolver con una estructura de redes neuronales. El problema radica en que no se puede calcular analíticamente y a priori cual es el número óptimo de capas y de neuronas a utilizar en cada caso. Existen distintas formas más o menos empíricas para calcular el número de neuronas necesarias. Por ejemplo, en el método del crecimiento se parte de una red muy simple, con la cual intuitivamente se puede esperar que no será posible resolver un problema dado, y paulatinamente se van añadiendo neuronas hasta que se encuentre una estructura que puede resolverlo. Otro método propuesto es el método de reducción o poda, similar al anterior sólo que se parte de una red sobredimensionada y se reduce paulatinamente. El método más efectivo es combinar ambos métodos en un método de crecimiento/poda en el que alternativamente se introduce un crecimiento y una reducción. El número de neuronas intermedias, ocultas, suele oscilar entre $2N_0+1$ y $3N_0$, siendo N_0 el número de neuronas de entrada; en muchos casos este número es aproximadamente el 50% de la suma de las neuronas de entradas y de salida. En cualquier caso, se debe tantear la arquitectura óptima empíricamente para cada problema concreto.

Coefficiente de aprendizaje (μ): Este coeficiente marca el tamaño del "paso" utilizado en el aprendizaje para la búsqueda del mínimo error. Está localizado en el intervalo (0,1) y se debe optimar durante el período de aprendizaje. Una forma metódica de optimarlo es mediante el método de Darken y Moody:

$$\mu(k) = \frac{\mu_0}{1 + \frac{k}{k_0}} \quad (1.16)$$

o por la expresión:



$$\mu(k) = \frac{\mu_0(1 + c \frac{k}{\mu_0 k_0})}{1 + c \frac{k}{\mu_0 k_0} + \frac{k^2}{k_0}} \quad (1.17)$$

donde μ_0 es el coeficiente de aprendizaje de partida (que debe tener valor mayor que 0), c es un parámetro a optimar (mayor que cero), k_0 es un coeficiente que se encuentra en el intervalo (100-500) optimable experimentalmente y k es un contador de las iteraciones realizadas, de esta manera μ disminuye con k .

El coeficiente de aprendizaje puede ser determinado mediante el algoritmo que se muestra en la ec. 1.18. Dicho algoritmo esta relacionado con la función sigmoide (Palancar et al, 1998, Torrecilla, 1995) e interpola valores de dicho coeficiente por debajo de coeficiente de aprendizaje máximo ($\mu_{\text{Máximo}}$) fijado previamente y 0.

$$\mu = \frac{\mu_{\text{max}}^2}{1 + e^{-\mu_{\text{max}}}} \quad (1.18)$$

Intensidad de unión: Las intensidades de las uniones vienen dadas por los pesos. Estos pesos se inicializan de una manera aleatoria, generalmente con valores pequeños dentro de un intervalo (-1,1). Otra alternativa es partir de unos pesos obtenidos previamente para un problema en concreto similar al actual. Cuando se determina el número de neuronas por el método de crecimiento/poda se debe tener en cuenta que siempre que se parta de una nueva topología de red se debe partir de pesos inicializados aleatoriamente. Una descripción más detallada de la optimación de los pesos se expone en el apartado siguiente.

Tipo y tamaño de muestras de aprendizaje. Se debe estudiar tanto el tipo como el tamaño de la muestra de aprendizaje. La característica fundamental y necesaria de la muestra de aprendizaje es que ésta caracterice lo mejor posible al sistema a simular. Dada la importancia



de este factor, se deben probar distintos tipos de muestras, generando parejas de valores de diferente naturaleza, para seleccionar una muestra de aprendizaje que sea representativa del proceso a simular o modelizar.

1.4.2.1.3.-Proceso de aprendizaje de la Red

El proceso de aprendizaje consiste en la optimación de los pesos con parejas de valores de entrada y salida conocidos. Dado un vector de entrada, resulta sencillo determinar el conjunto de pesos que da lugar a un valor de salida concreto. El problema es hallar un único vector de pesos que pueda asociar con éxito cada vector de entrada con el vector de salida deseado. El algoritmo de retropropagación, que se describe a continuación, es el método más utilizado para hallar dicho vector de pesos.

Retropropagación del error: El método de retropropagación del error fue desarrollado por Rumelhart, Hinton y Williams (Rumelhart et al, 1986) sobre la base de trabajos de Werbos y Parker (Werbos, 1974; Parker, 1982). El proceso de aprendizaje se incorpora al propio dispositivo de cálculo, que se *autoadapta* a medida que se presentan las entradas y salidas deseadas. Se hacen pequeños ajustes en los valores de los pesos cada vez que se procesa una combinación entrada/salida hasta que la red da unas salidas correctas, o bien si la modificación de los pesos llega a ser despreciable frente al valor de los mismos. En cierto sentido, este proceso es un verdadero proceso de entrenamiento, porque no se necesita calcular explícitamente el valor del vector de pesos sino que, mediante el cálculo que se describe más adelante, se van ajustando los pesos partiendo de unos valores totalmente aleatorios. Por otro lado, y como se desprende de lo anterior, estos pesos no tienen, en principio, un sentido físico o relación con el tipo o naturaleza del proceso para el que se esté diseñando la red.

El aprendizaje es, en definitiva, el cálculo de un vector de pesos para los que el error definido en la ec. 1.12 sea mínimo. Para encontrar este mínimo se toma la derivada del error con respecto a W_{ab} , ya que esta variable caracteriza la intensidad de la conexión entre dos capas de la red:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ab}} = U_{ia} U_{jb} (1 - U_{jb}) \Omega_n \quad (1.19)$$



donde $U_{jb}(1-U_{jb})$ representa la derivada de la función sigmoide.

Dependiendo de la capa que se considere, el valor de W será diferente. Para la capa de salida k , se tendrá el error de salida de la red:

$$\Omega_n = (y_{kc} - d_c) \quad (1.20)$$

Por otro lado, si se evalúa la capa intermedia, j , el valor de Ω_n es:

$$\Omega_n = \sum_{c=1}^C W_{bc} y_{kc} (1 - y_{kc}) (y_{kc} - d_c) \quad (1.21)$$

El error dentro de una capa intermedia se corresponde con el error en la última capa multiplicado por el valor de los pesos propios de las conexiones que unen a ambas y por la derivada de la función de transferencia. De esta manera se soluciona la aparente imposibilidad de poder encontrar el error dentro de la capa oculta. Conforme a las ecuaciones anteriores, la optimización de pesos se puede formular por el algoritmo de retropropagación:

$$\Delta W_{ab} = -\mu U_{ja} U_{kb} (1 - U_{kb}) \Omega_n \quad (1.22)$$

$$\Delta W_{bc} = -\mu U_{kb} y_{kc} (1 - y_{kc}) \Omega_n \quad (1.23)$$



Este algoritmo asegura que se encontrará un mínimo del error, pero no que éste sea suficientemente pequeño ni tampoco que el número de iteraciones necesarias sea razonablemente pequeño. Por ello, en el proceso de aprendizaje se pueden presentar varios problemas:

Estabilidad vs Plasticidad: El objetivo fundamental del aprendizaje es que la red sea lo más estable posible, es decir, que el error sea muy pequeño y que la red sea flexible, o lo que es lo mismo, que se adapte a un cambio de entorno. Sin embargo, cuanto más estable sea la red, menos sensible será ante un cambio de entorno. Por ello es necesario llegar a una solución de compromiso entre ambas características.

Fidelidad vs Generalización: La red debe “memorizar” bien cada situación del sistema y a la vez ser de aplicación generalizada. Pero cuanto mayor sea la fidelidad para una situación concreta la generalización decrece. Un sobreaprendizaje con un determinado conjunto de muestras provoca un exceso de fidelidad a dicho conjunto. Aunque este conjunto de datos de entrenamiento sea representativo del sistema real, no es el propio sistema real. Debido a ello, si el sistema real pasa por una situación no contemplada en el conjunto de entrenamiento, la red no realiza una identificación adecuada. Para solventar este problema se elige una muestra representativa del problema; el 80% de los datos se utiliza para el entrenamiento y el 20% restante se utiliza para comprobar la generalidad y estabilidad de los pesos generados.

En la Figura 1.22. se muestra un ejemplo de verificación de la generalización. La representación es la variación del error frente al número de iteraciones en el proceso de aprendizaje. La curva 2 muestra el proceso de aprendizaje utilizando el 80% de la base de datos correspondiente al entrenamiento; la curva 1 representa la variación del error que se obtiene utilizando el mismo algoritmo que en la curva 2 pero utilizando como datos de entrada-salida el 20% restante de la muestra. En la curva 2 se observa que disminuye la pendiente hasta llegar a un tramo horizontal caracterizado por el punto "a"; se puede considerar que en este punto ha finalizado el proceso de aprendizaje, ya que nuevas optimaciones de los pesos no disminuyen el error. La curva 1 presenta un mínimo en el punto "b", que indica el mínimo error que se obtendría para el conjunto total de la muestra. Este dato sirve para evaluar el grado de estabilidad y fidelidad de los pesos obtenidos. En un caso así se tomarían los pesos correspondientes al punto "b", ya que representarían la solución de compromiso entre la fidelidad y la generalización.



En el proceso de aprendizaje puede ocurrir que la búsqueda del mínimo sea excesivamente lenta. Esto es debido a que nos encontramos en una zona definida como "c" en la Figura 1.22. Las soluciones son actuar sobre el coeficiente de aprendizaje o bien inicializar de nuevo los pesos para intentar encontrar un mínimo operativo.

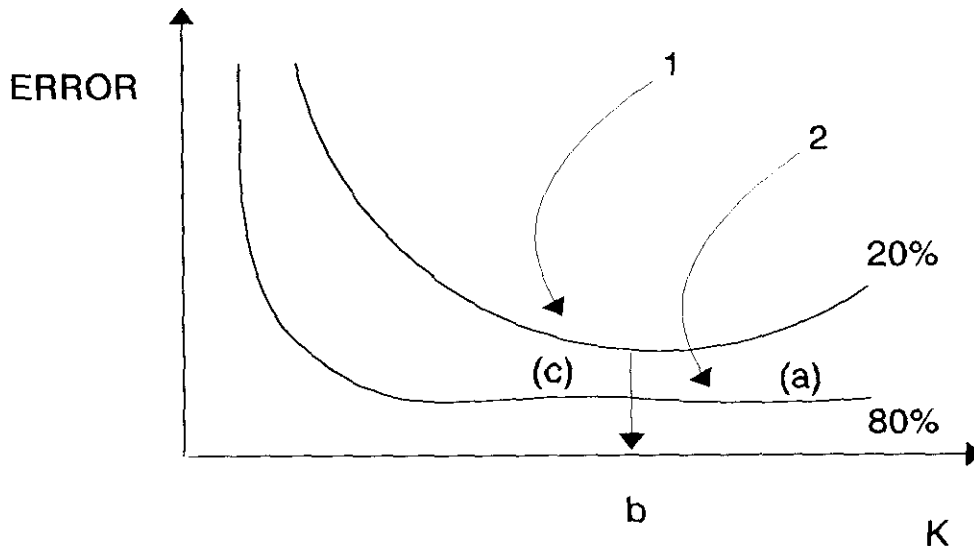


Figura 1.22.-Validación del aprendizaje

En la aplicación de redes neuronales artificiales a procesos variables con el tiempo existen dos tipos de aprendizaje según se considere cuándo y dónde se realiza el entrenamiento de la red:

Aprendizaje en línea ("on-line"): También llamado con refresco continuo o periódico. Se realiza sobre el proceso en funcionamiento. En el proceso en funcionamiento no se conoce ningún futuro real por lo que no se dispone de muestras de entrenamiento. Para salvar este inconveniente se utilizan valores pasados recientes de la variable, como datos de aprendizaje.

Aprendizaje independiente o en paralelo ("off-line"): Se realiza antes de aplicar la red neuronal al proceso real o de forma independiente a él. Se utilizan muestras de entrenamiento procedentes de bases de datos históricos o bien de datos generados por modelos de simulación del proceso.



La muestra de entrenamiento debe tener un número de datos que, sin ser excesivos, sean representativos y no redundantes. Como idea orientativa, se necesitan unos 10 datos por peso de la red, es decir si una red tiene 500 uniones neurona-neurona necesitaríamos unos 5000 datos (conjuntos completos de datos de entrada-salida) para el aprendizaje. Todos los datos de la muestra se deben presentar a la red alternativamente y de una forma más o menos aleatoria, de manera que la red en su aprendizaje no se acomode a una dinámica o tendencia de datos determinada.



1.5.-OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

1.5.1.- *Objetivos*

Dentro del marco del mercado oleícola español tiene una gran trascendencia, tanto técnica como económicamente, el tratamiento de los subproductos generados en la extracción del aceite de oliva. Actualmente el subproducto fundamental del proceso de molturación de la aceituna para la producción de aceite de oliva es el orujo de dos fases, sobre el que se centra la investigación descrita en la presente memoria.

Actualmente se viene produciendo en cada campaña del orden de 2.600.000 t. de orujo (Tardáguila et al, 1996), por ello es de gran importancia seleccionar los procesos adecuados para su tratamiento y aprovechamiento y de esta forma proporcionar una mayor rentabilidad al mercado del aceite de oliva.

Tradicionalmente el orujo, tanto procedente de prensas como de sistemas de dos o tres fases, se utiliza para la producción de aceite de orujo mediante un proceso de extracción con hexano seguido de un proceso de refinado. Para que dicha extracción sea factible técnica y económicamente es necesario que el orujo presente una humedad adecuada (en torno al 8-10% en base húmeda). Teniendo en cuenta que el orujo de dos fases se produce con una humedad de hasta el 60%, es de vital importancia disponer de un sistema de secado adecuado para poder acondicionar el producto como paso previo a la extracción con hexano.

Hasta el momento, los sistemas de secado presentan un buen rendimiento para sólidos con humedad hasta del 50% (orujo de tres fases); por el contrario, presentan un rendimiento muy bajo con sólidos con humedades más elevadas. Por ello es importante el estudio y diseño de secaderos que puedan preparar el producto a tratar para las operaciones posteriores con un rendimiento energético adecuado y de forma que el aceite de orujo producido en la extracción presente unas características adecuadas. El orujo húmedo debe ser secado en las condiciones más idóneas, con optimización del consumo energético y la producción de un orujo tal que genere, posteriormente a la extracción con hexano, un aceite de orujo de alta calidad (baja acidez, alto contenido graso, etc.). El gasto en dichas operaciones (secado, extracción y refinado) debe ser el menor posible para optimar el rendimiento económico.



El objetivo general de la presente investigación es el estudio de secaderos basados en una nueva combinación de lecho móvil y fluidizado y el desarrollo de un secadero de este tipo para el secado de orujo que mejore el rendimiento energético y económico, con respecto a los actuales sistemas de secado, y que permita obtener un sólido con las condiciones adecuadas para su extracción posterior.

El objetivo general incluye los siguientes objetivos concretos:

1. Diseñar y construir un secadero de lecho fluidizado/móvil que opere en continuo.
2. Optimizar el diseño del secadero para minimizar los problemas de funcionamiento derivados de las características del orujo.
3. Optimizar las condiciones de operación para obtener un incremento positivo del rendimiento energético respecto a los secaderos convencionales.
4. Realizar una modelización del proceso de secado del orujo que facilite el cambio de escala del secadero desarrollado.
5. Desarrollar y optimar un sistema de control que mantenga las especificaciones requeridas para el producto, durante la operación de secado en continuo.

1.5.2.- Plan de trabajo

El estudio, modelización, diseño, construcción y optimación del secadero se ha llevado a cabo siguiendo el siguiente plan de trabajo:

1. Revisión Bibliográfica sobre los siguientes temas:
 - Generación, caracterización, problemática y validación del orujo.
 - Tipos de contactores utilizados en la Industria Química.
 - Secado de sólidos y tipos de secaderos utilizados en la Industria Química.
 - Modelización de sistemas mediante redes neuronales artificiales.
2. Diseño, construcción y montaje del secadero fluidizado/móvil y de los elementos auxiliares de la instalación (sistemas de alimentación, extracción de sólido, alimentación y calefacción del aire).



3. Selección de las variables a medir y manipular durante la operación de secado y selección calibrado e implementación en la instalación de los elementos de medida y actuación.
4. Realización de pruebas en frío y caliente para comprobar la calidad del contacto aire-sólido y la estanqueidad del secadero fluidizado/móvil.
5. Realización de experimentos para estudiar los aspectos que se muestran a continuación. Obtención y discusión de resultados experimentales.:
 - Determinación de las propiedades fluidodinámicas del orujo fresco (a la salida de la almazara) y de mezclas de éste con el orujo seco.
 - Determinación de las variables que influyen en la operación de mezclado del orujo fresco y seco y de la influencia que ejerce el grado de mezcla en el proceso de secado.
 - Determinación de la humedad de equilibrio del orujo
 - Determinación de la influencia en la eficacia del secado del tamaño del sólido y del tipo de contacto.
 - Determinación de la fluidodinámica del lecho fluidizado.
 - Determinación de la influencia de la temperatura y caudal de aire en el secado en lecho fluidizado.
 - Determinación de la influencia de la temperatura de operación, grado de mezcla y caudal de aire en la eficacia del secadero fluidizado/móvil.
6. Modelización del sistema.

A partir de los resultados experimentales se realizaran las siguientes modelizaciones.

 - Cinética de secado en lecho fluidizado.
 - Modelización del secadero fluidizado/móvil mediante redes neuronales artificiales.
7. Elaboración de extensiones y aplicaciones al diseño industrial, con objeto de integrar todos los resultados obtenidos con la implementación de sistemas a escala industrial.
8. Elaboración de la presente memoria.

2.-DESCRIPCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPO EXPERIMENTAL



2.- DESCRIPCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPO EXPERIMENTAL

2.1.-TERMINOLOGÍA EMPLEADA

Dentro del mundo oleícola, y más concretamente en el sector del aprovechamiento de sus subproductos, existe un gran abanico de términos referidos a los materiales y las tecnologías objeto de este sector. Con el fin de aclarar y facilitar lo más posible la adecuada comprensión de la presente memoria se muestra a continuación una revisión de dicha terminología:

- **Humedad del sólido:** es la humedad en base húmeda, que se define como

$$\text{Humedad}(\%bh) = \frac{(\text{Peso sólido húmedo} - \text{Peso sólido seco}) \cdot 100}{\text{Pesosólido húmedo}} \quad (2.1)$$

Un sólido se considerará totalmente seco cuando su humedad sea prácticamente su humedad de equilibrio.

- **Orujo** se denomina así al subproducto sólido-líquido que se produce en la molturación de la aceituna cuando se emplea la decantación de dos fases. Éste es el sólido que se utiliza en la presente investigación. Con el fin de concretar más exactamente las características fisico-químicas de dicho sólido se definen los siguientes términos:
 - **Orujo fresco:** Es el orujo según sale del proceso de separación (decantador de dos fases); como se indicará posteriormente tiene una humedad del orden del 60-65 %.
 - **Orujo seco:** Describe al orujo fresco después de haberse eliminado prácticamente toda el agua libre (humedad libre) contenida en el orujo fresco. Presenta una humedad coincidente con su humedad de equilibrio a la temperatura de operación.
 - **Orujo Húmedo:** Es una mezcla de orujo fresco y seco. La humedad de dicho sólido es del orden de 50-60 %.



- **Orujo agotado:** Es el sólido que se produce al extraer por métodos físicos (repassado en decantador) el aceite que contiene el orujo.
- **Orujo presecado:** Es el sólido, parcialmente seco, que ha sido tratado en el lecho móvil del secadero fluidizado/móvil o ha sido secado en otros equipos, hasta una humedad del 20-25%.
- **Orujo de tres fases:** es el sólido que se genera junto con el aceite y el alpechín como resultado del proceso de molturación de la aceituna mediante el proceso de tres fases.
- **Orujillo:** Es el sólido que se genera al finalizar la extracción del aceite que queda en el orujo de dos o tres fases, utilizando hexano como agente de extracción
- **Composición de la aceituna:** Una aceituna esta compuesta fundamentalmente por tres partes, que se muestran a continuación:
 - **Epicarpio:** Es la parte más externa de la aceituna (piel).
 - **Mesocarpio:** Es la parte comprendida entre la piel y el hueso (pulpa).
 - **Endocarpio:** Corresponde al hueso de la aceituna (hueso) en cuyo interior se encuentra la semilla.



2.2.-DESCRIPCIÓN DE MATERIALES

Dado que la aceituna, como fruta, está compuesta básicamente por epicarpio, mesocarpio y endocarpio, en las proporciones que se muestran en la tabla 2.1, el proceso de molturación genera un residuo cuya composición es similar al de la aceituna.

Tabla 2.1.- Composición física macroscópica de la aceituna

COMPOSICIÓN	CONTENIDO (%)
EPICARPIO	1 - 2
MESOCARPIO	75 - 80
ENDOCARPIO	15 - 20

El orujo es utilizado con múltiples fines y cada uno de sus constituyentes pueden tener aplicaciones diferentes, como por ejemplo:

Epicarpio: Obtención de ceras.

Mesocarpio: Producción de aceite de orujo, alimentación para animales, etc.

Endocarpio: Producción de carbón activo, combustible sólido, etc.

Los tratamientos y análisis desarrollados en este trabajo pueden aplicarse al orujo con o sin hueso o con porcentajes diferentes de éste obtenido por tratamientos especiales de separación. A lo largo de la presente memoria se realizará un estudio del orujo tal y como sale del proceso de molturación.

El orujo que se ha utilizado ha sido generado mediante la molturación de olivas cuya variedad principal es Picual. La variedad Picual es característica de las zonas andaluzas de Jaén y Córdoba. En la tabla 2.2 se muestra los pesos de tres olivas y de su pulpa y hueso y relación entre estas últimas (Frias et al, 1991). El peso de hueso es fuertemente dependiente de la variedad y del tamaño del fruto, por ejemplo en la variedad Picual, como se muestra en la tabla 2.2, el peso oscila entre 0.5 y 0.7 g mientras que en la Arbequina este peso está comprendido entre 0.25 y 0.35 g.



Tabla 2.2.- Pesos de fruto, hueso, pulpa y relación de olivas de la variedad Picual

PESO DEL FRUTO (g)	PESO DEL HUESO (g)	PESO DE LA PULPA (g)	RELACIÓN PULPA/HUESO
4.18	0.68	3.50	5.14
2.35	0.51	1.84	3.61
3.05	0.61	2.44	4

En la tabla 2.3 se muestran distintas características de la aceituna de variedad Picual así como características de los aceites y orujos producidos (Alba, 1991).

Tabla 2.3.- Caracterización de la oliva, aceite y el orujo producidos a partir de la aceituna variedad Picual

CARACTERÍSTICAS DE LAS ACEITUNAS			
<i>Humedad (%bh)</i>		40.44	
<i>Riqueza Grasa sobre seco (%)</i>		40.69	
<i>Riqueza Grasa sobre húmedo (%)</i>		24.23	
<i>Riqueza Grasa Parcial (%)</i>		20.50	
<i>Extractabilidad (%)</i>		84.61	
<i>Acidez (°)</i>		0.63	
Características del Aceite producido		Oliva	Orujo
<i>Acidez (°)</i>		0.37	0.72
<i>Índice de Peróxidos (meq O₂/kg)</i>		13.5	19.8
<i>K₂₃₂</i>		2.29	1.68
<i>K₂₇₀</i>		0.13	0.19
<i>ΔK</i>		0	0
<i>Ceras (mg/100g)</i>		7.2	98.7
Características de los orujos producidos		dos fases	dos + tres fases
<i>Humedad (%bh)</i>		57.94	45.89
<i>Riqueza Grasa sobre seco (%)</i>		5.31	3.16
<i>Riqueza Grasa sobre húmedo (%)</i>		2.23	1.70
<i>Acidez (°)</i>		1.84	3.49

Como se muestra en la tabla 2.3, el valor de la humedad de la aceituna es menor que la del orujo producido mediante un decantador de dos fases, esto se debe al agua añadida en el proceso de molturación. La humedad del orujo producido mediante el uso de un único decantador es mayor que el producido con dos (decantadores de dos y tres fases), esto es debido principalmente a la segunda decantación en la que también se separa parcialmente el agua que contiene el orujo. Por otro lado,



se observa la disminución del contenido graso desde la aceituna hasta el orujo, presentando este último un contenido graso que rentabilizaría un proceso extractivo.

En la tabla 2.4, se muestra una analítica de un orujo fresco, de la campaña del 1996/97, proporcionada por Oleícola El Tejar S.A.. Debe tenerse en cuenta que al ser una estadística combinada, los porcentajes no tienen por qué sumar 100.

Tabla 2.4.- Caracterización genérica de orujo fresco

PARÁMETROS	CONTENIDO
<i>Humedad (%bh)</i>	67
<i>Riqueza grasa (%)</i>	1
<i>Acidez(°)</i>	4
<i>Fibra (%)</i>	25
<i>Proteínas (%)</i>	8
<i>Hueso (%)</i>	27
<i>Pulpa (%)</i>	73

2.2.1.- Composición del orujo

La composición del orujo es variada dependiendo de la variedad de la oliva molturada, del proceso desarrollado para la obtención del aceite de oliva y, en general, de la historia (tiempo y condiciones desde su producción) que presente dicho efluente. En la tabla 2.5. se muestra una composición típica del orujo.

Tabla 2.5.- Composición típica del orujo

Tipo	Cenizas (%)	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Azúcares (%)	Taninos (%)	Nitrógeno (%)	pH
Orujo fresco	7.1	4.34	13.56	2.31	2.70	2.48	5.3
Orujo sin hueso	7.65	7.18	9.44	1.48	2.18	2.1	4.87
Orujo agotado	9.12	0.28	8.65	1.21	2.61	1.96	5

En las tablas 2.6 y 2.7. se muestran la composición típica de un orujo agotado y de sus cenizas respectivamente. Por otra parte, en el orujo extractado con hexano la humedad está comprendida entre el



8 y 12% y hay un bajo contenido en proteínas y lípidos residuales. La composición de las cenizas se muestra en la Tabla 2.7. En ésta cabe destacar la alta proporción de potasio y calcio en la muestra.

Tabla 2.6.- Composición del orujo agotado y seco (Proyecto IMPROLIVE)

Proteínas (%)	Lípidos (%)	Celulosa (%)	Cenizas (%)	Extractivos (%)
6	1	27.4	6.5	59.1

Tabla 2.7.- Composición de las cenizas (Departamento de Ingeniería Química, E.T.S Ingenieros Industriales, Universidad de Valladolid)

K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	MgO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)
12	0.6	11.6	28.2	5.4	5.7	0.29	4.7

La composición de las cenizas mostrada en la tabla 2.7 no suman 100 puesto que existen multitud de compuestos tales como molibdeno, plomo, vanadio, bario, cobre, níquel, estroncio, etc. que están en la muestra en cantidades del orden de ppm.

2.2.2.- Propiedades físicas del orujo de interés en el secado

El orujo, debido al proceso de dos fases mediante el que ha sido producido, presenta un contenido elevado en agua. El agua lleva disuelta gran cantidad de componentes solubles, tales como azúcares, sales minerales y otros componentes químicos que modifican sensiblemente las propiedades que presenta el orujo sobre todo a la hora de secarlo.

Una de las propiedades físicas que es importante en el diseño de equipos para el tratamiento del orujo fresco es la viscosidad. La viscosidad de una pasta de este tipo es un parámetro difícil de medir experimentalmente debido a la complejidad del sistema sólido-líquido que forma la pasta. Parte de este sistema es un gel rico en líquido formado por macromoléculas filiformes entrelazadas en forma de esponja. La naturaleza de las fuerzas que mantienen la consistencia de este gel no están bien establecidas, por lo que no es fácil estimar valores absolutos de magnitudes reológicas tales como la viscosidad, ductibilidad, consistencia, etc., debido a que con frecuencia se presentan deformaciones plásticas o elásticas de corta duración, que desaparecen antes de alcanzarse un estado de equilibrio capaz de permitir



una medida suficientemente precisa de dichas magnitudes (Cantos et al, 1983). La consistencia de la pasta de aceituna en términos de momentos de torsión, es muy difícil expresarla en términos de viscosidad aparente, debido a que habría que introducir un factor dependiente del equipo y de las condiciones de operación.

Más aún, aparte de que el valor concreto de la viscosidad es de por sí de difícil determinación experimental y teórica (Cantos et al, 1983), dicha magnitud varía profundamente con multitud de parámetros relacionados con las condiciones de almacenamiento, tratamientos y de producción. El orujo se puede considerar como un fluido no-newtoniano, ya que presenta un esfuerzo cortante mínimo por debajo del cual dicho sólido no fluye. La viscosidad varía con variables tales como la temperatura, presión, tiempo de almacenamiento, esfuerzo cortante, humedad, etc.

2.3.-DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo con el que se llevó a cabo la presente investigación se montó en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid. Se utilizaron los distintos servicios auxiliares del mismo (electricidad, agua, aire comprimido, etc.).

A continuación se describe detalladamente cada uno de los elementos que forman parte de la instalación y que se han agrupado en las siguientes unidades:

1. Sistema de circulación de gases.
2. Sistema de circulación de sólidos.
3. Contactor-Secadero.
4. Sistemas de calefacción.
5. Sistemas de medida.
6. Sistemas de control.

Cada uno de estos sistemas están representados en la Figura 2.1 y cada parte del mismo está referenciado a lo largo de toda la memoria.

2.3.1.- Sistema de circulación de gases

El sistema de circulación de gases está constituido, en primer término por un compresor, accionado por un motor trifásico, las características están recogidas en la tabla 2.8.

Tabla 2.8.- Características del compresor

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COMPRESOR	
<i>Voltaje (V)</i>	220-230
<i>Potencia (CV)</i>	1
<i>Revoluciones (r.p.m.)</i>	2800
<i>Amperaje (A)</i>	3.1-1.8
<i>Presión de operación (bar)</i>	6-7
<i>Caudal nominal (LN/s)</i>	6



A éste van acoplados una serie de tuberías con el fin de transportar el aire a la presión requerida. Como paso previo a la entrada del gas al secadero se usaron otros dispositivos de calefacción, medida y control, que se tratan en los apartados 2.3.4, 2.3.5 y 2.3.6 respectivamente.

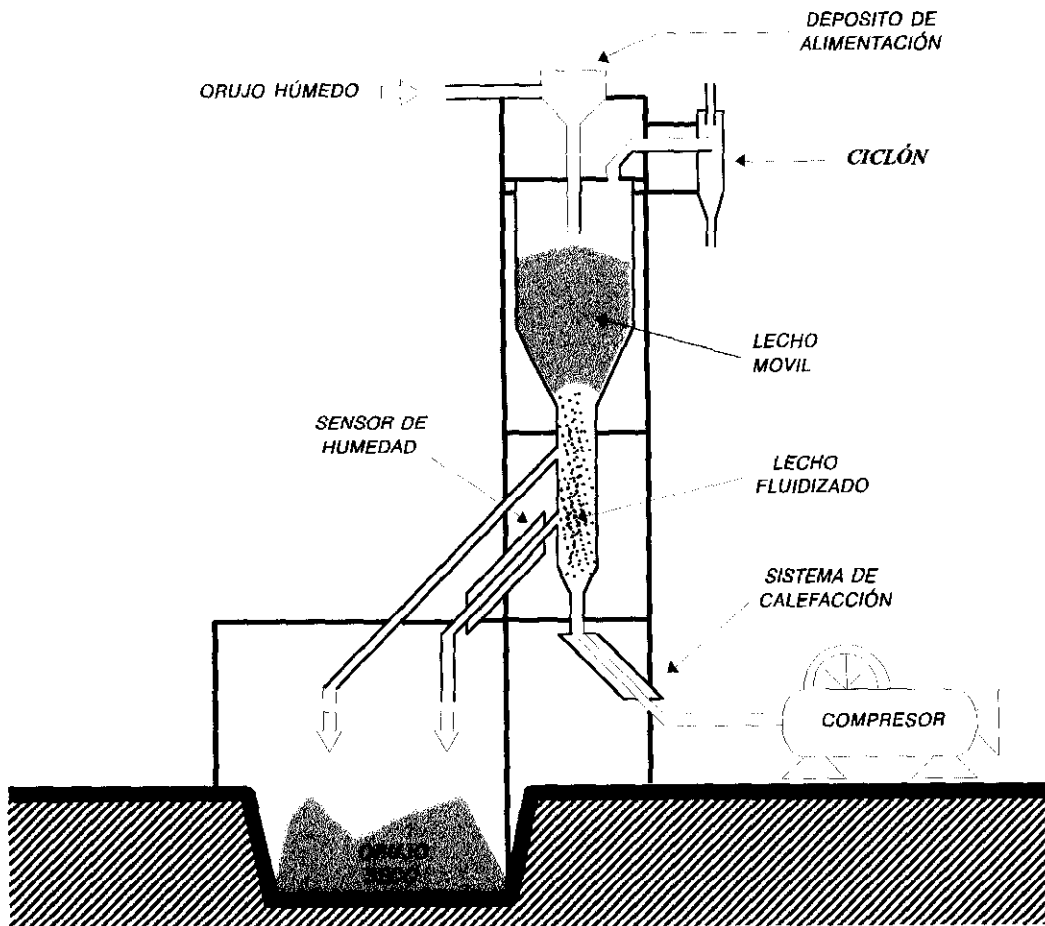


Figura 2.1.- Esquema del equipo experimental

2.3.2.- Sistema de circulación de sólidos

El sistema de circulación de sólidos está compuesto por sistemas de alimentación de orujo húmedo y retirada de sólido seco del secadero. Dichos sistemas han sido seleccionados y optimados experimentalmente. La alimentación al reactor se realiza mediante gravedad desde un recipiente cilíndrico, con un volumen de 14 L de capacidad (0.2 m. de altura y 0.15 m. de diámetro). En la



parte inferior del mismo presenta una salida de 0.03 m de diámetro, comunicando ésta directamente con el lecho móvil del contactor.

Los sistemas probados para la descarga del sólido del secadero, más concretamente del lecho fluidizado, han sido dos: válvula J y válvula de mariposa de acción todo-nada, con el fin de tratar el sólido seco sin posibilidad de atascos.

El sistema de descarga de sólido más utilizado en el secadero ha sido la válvula J (Aragón et al, 1998). La válvula J es un sistema de dosificación de sólido mediante aire comprimido (4kg/cm^2). Dicha válvula, como se muestra en la Figura 2.2, esta formada por un sistema de alimentación de sólido, que es un cilindro cuyo diámetro depende principalmente del tamaño de partícula del sólido a dosificar; el sólido se alimenta mediante un tubo que forma un ángulo de 45° con el cilindro vertical donde se almacena el sólido a dosificar. A este lecho vertical se le introduce por su parte inferior disparos de aire comprimido confiriendo al sólido una velocidad por encima de su velocidad de arrastre durante cortos períodos de tiempo (0.1 a 1 s) con lo que dicho sólido es extraído fuera del lecho y de esta forma es dosificado.

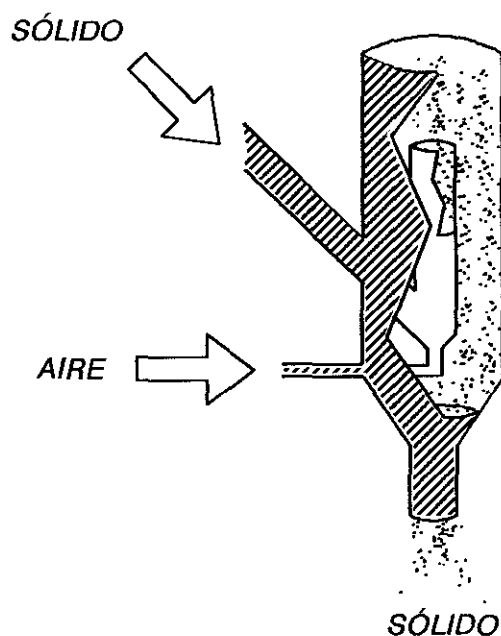


Figura 2.2.- Descripción de una válvula J



El sólido a utilizar debe mostrar un aspecto particularizado. Por ello, este sistema de dosificación no es válido para pastas sólido-líquido de alta humedad o viscosidad como por ejemplo lodos de depuradora, etc., ya que sus características impiden el libre movimiento del sólido a lo largo de la válvula J, evitando de esta forma la dosificación uniforme de sólido.

En la Figura 2.3. se muestra las dimensiones de la *válvula J* utilizada en el proceso de secado (las cotas están en milímetros). Ésta está construida en acero inoxidable de espesor 2 mm.

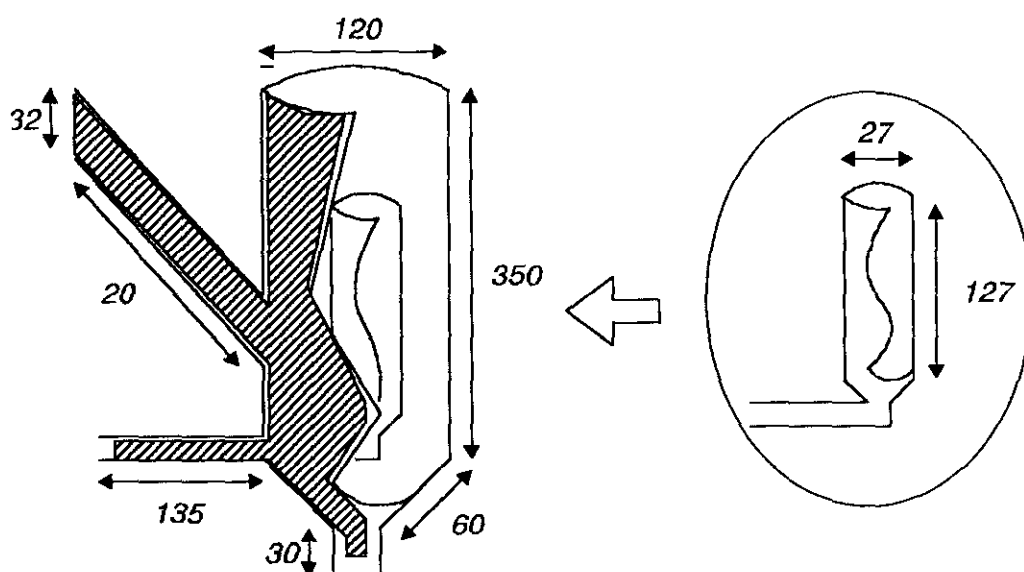


Figura 2.3.- Descripción dimensional de una *válvula J*

El caudal de sólido que dosifica la *válvula J* se regula variando la frecuencia y duración de los disparos del aire. La ecuación de calibrado de la *válvula J* depende de la humedad del sólido. Por ejemplo, en la Figura 2.4 se ha representado el caudal de sólido frente a la humedad de éste, cuando los disparos de aire a presión son de 4 kg/cm^2 , con una frecuencia de disparo 1 segundo y un tiempo de apertura de 0.5 s. Este comportamiento de la *válvula J* no es un impedimento para utilizarla en este trabajo ya que la humedad del sólido seco presenta unos valores comprendidos en un estrecho intervalo, por lo que las variaciones del caudal de sólido, debidos a su humedad también son pequeñas. Un análisis más pormenorizado de la fluidodinámica de este tipo de *válvulas* está realizado en un trabajo de investigación desarrollado dentro del mismo equipo de investigación.

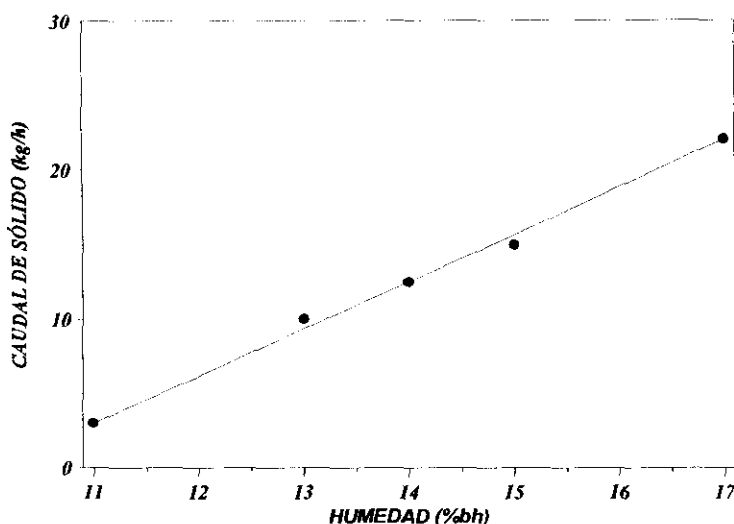


Figura 2.4.- Dependencia del caudal con respecto a la humedad del sólido dosificado.

2.3.3.- Contactor / Secadero

El contactor empleado, como se muestra en la Figura 2.1, está compuesto por un lecho fluidizado y un lecho móvil. Es alimentado por su extremo inferior por una mezcla de aire caliente y frío, las proporciones de dichas corrientes establecen la temperatura del medio fluidizante del secadero.

Lecho fluidizado: es un cilindro de acero suave con una altura de 0.475m, diámetro interno de 0.054 m y un espesor de 3 mm. Tiene dos salidas de sólido de diámetro interno de 0.019m cada una, situadas a 0.085 m y 0.208 m de la base del mismo. El ángulo que presentan dichas salidas con respecto al lecho es de 45°. En la base del lecho se dispone de un distribuidor tipo sandwich, para uniformizar y mejorar el contacto sólido-gas.

Lecho móvil: está formado por dos partes geoméricamente diferenciadas un tronco-cono y, sobre él, un cilindro. El tronco-cono tiene un diámetro menor de 0.054 m y un diámetro mayor de 0.192 m, presentando un ángulo incremental de 65°. El cilindro tiene una altura de 0.305 m y un diámetro de 0.192 m. La pared del recipiente es de acero suave y tiene un espesor de 3 mm.

Según se muestra en la Figura 2.1, el lecho fluidizado constituye la base física del contactor, sobre él está situado el lecho móvil. Para conservar la estanqueidad del recipiente, el lecho móvil dispone de un tapa de acero suave de 5 mm de espesor con una salida para conectar el



separador ciclónico a la salida del equipo y una entrada para la alimentación de sólido húmedo al sistema.

Un esquema más detallado del contactor se muestra en la Figura 2.5. El aire, como medio fluidizante y desecante, entra en el equipo por la parte inferior del lecho fluidizado a través de un difusor. En esta parte, el aire contacta con el sólido fluidizado para posteriormente, siguiendo su camino ascendente, contactar con el sólido presecado situado dentro del lecho móvil. Por otro lado, el orujo húmedo a tratar es alimentado por gravedad al lecho móvil desde el recipiente de almacenamiento y desde éste se va alimentando al lecho fluidizado una vez presecado por el contacto con el aire, ya mencionado.

En la Figura 2.5 se pueden observar los flujos respectivos de sólido y de aire dentro del secadero fluidizado/móvil:

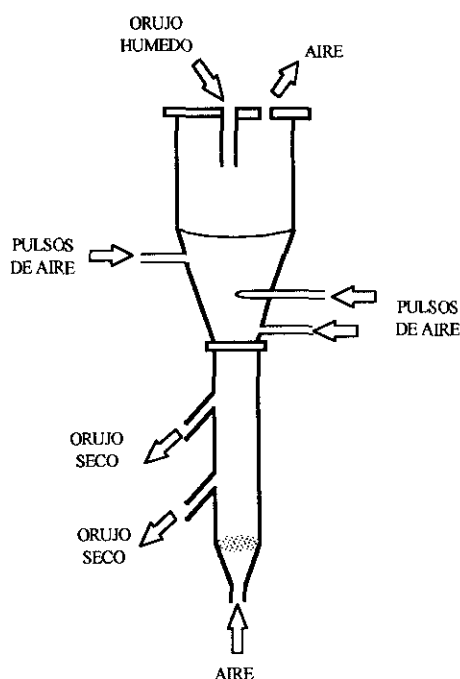


Figura 2.5.- Flujo de fluidos y sólidos dentro del secadero fluidizado/móvil

En la alimentación de sólido presecado al lecho fluidizado, zona tronco-cónica, se crea un equilibrio entre el fluido ascendente y el sólido presecado que es alimentado al lecho fluidizado. Dicho equilibrio de fuerzas genera una bóveda, tanto más difícil de romper cuanto mayor es la humedad del sólido presecado. Para la rotura de dicha estructura, una de las posibilidades ensayadas



con éxito en la presente investigación es provocar el aumento de la porosidad del lecho situado sobre dicha bóveda. Para ello se introducen pulsos de aire comprimido (4 Kg/cm^2) de 0.5 s. de duración. De esta forma al aumentar la porosidad del lecho la caída de sólido se facilita notablemente. Como se muestra en la Figura 2.5, dichos pulsos se introducen en la parte tronco-cónica del lecho móvil. Las entradas de dichos pulsos se reparten en tres puntos equidistantes a lo largo del perfil del tronco-cono del lecho móvil. Estos disparos se regulan mediante una electroválvula tipo WKB 5377 de diámetro nominal de 12 mm, con un campo presentando un rango de presión de trabajo de 0.1 a 20 bar y un temporizador. El temporizador empleado es un temporizador electrónico Crouzet Syrelec tipo MRLi 1 con una capacidad de temporización entre 0.1 s y 10 h. Capaz de controlar períodos de tiempo de apertura y períodos entre aperturas con una salida de 5 A y 250 V.

2.3.4.- Sistemas de calefacción

El sistema de calefacción cumple en la instalación la labor de calentar el aire que servirá, una vez dentro del equipo, para generar las condiciones térmicas y fluidodinámicas adecuadas para secar el sólido húmedo. Para ello se ha utilizado un tubo con una resistencia de 52 Ohm, conectada a la red eléctrica a una tensión de 220V. El caudal de calor aportado al fluido es controlado mediante un amperaje variable que oscila entre 0 y 4.2 A. Dicha resistencia está colocada en el interior de una tubería de acero suave de 7 cm de diámetro y 50 cm de longitud.

2.3.5.- Sistemas de medida

Las variables de operación medidas a lo largo de los experimentos son: caudal de fluido, variaciones de presión dentro del equipo, temperaturas en diferentes puntos del equipo experimental y humedad del sólido tratado.

El **caudal de fluido**, proveniente del compresor anteriormente mencionado, se regula mediante dos válvulas, una válvula de bola que sirve de llave de paso general y una válvula de aguja de regulación fina. El aire, después de pasar por dichas válvulas, pasa por un orificio medidor de presión diferencial. Para fijar un caudal de aire determinado fue preciso calibrar los orificios



medidores utilizados. Las ecuaciones 2.2 y 2.3 muestran las ecuaciones de calibrado de cada uno de los orificios medidores. La ec. 2.2 muestra el calibrado del orificio empleado para el aire caliente y la ec. 2.3 muestra la ecuación de calibrado para el aire frío, ambos caudales de aire acondicionan tanto la temperatura como el caudal de aire empleado para la operación de secado.

$$\log \left(q_0 \sqrt{P_0 \frac{M}{T}} \right) = 3.085 + 0.5153 \log(\Delta H_0) \quad (2.2)$$

$$\log \left(q_0 \sqrt{P_0 \frac{M}{T}} \right) = 3.28019 + 0.4937 \log(\Delta H_0) \quad (2.3)$$

donde q_0 representa el caudal de fluido en las condiciones del orificio (cm^3/s); P_0 es la presión absoluta en el orificio (mm Hg) (incluyendo la presión atmosférica y la sobrepresión en el orificio medidor); M representa el peso molecular del aire (g/mol); T es la temperatura en el orificio (K); ΔH_0 representa la pérdida de carga en el orificio (cca).

De igual forma se han medido incrementos de presión, como se ha mencionado anteriormente, para cuantificar el caudal de fluido alimentado al equipo. Dichas medidas se han realizado por medio de magistrales de agua y mercurio (agua para medir ΔH_0 y mercurio para medir P_0).

Pérdidas de carga y fluctuaciones de presión dentro del equipo: Las medidas de las fluctuaciones de presión dentro del equipo se realizan mediante magistrales cuyo líquido manométrico es agua. Las presiones medidas están referidas a la presión atmosférica. Las tomas de presión, como se muestran en el esquema del equipo de la Figura 2.6, están situados en la base del lecho fluidizado y en la base del lecho móvil. Se ha realizado también una medida diferencial de estas dos presiones. Con estas medidas se tiene una referencia del volumen de sólido que se está tratando en cada una de las partes del equipo.

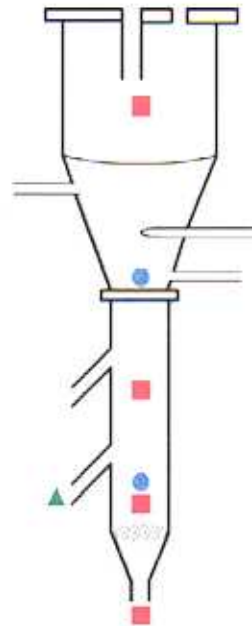


Figura 2.6.- Puntos de medida dentro del secadero: (●) Presión; (■) Temperatura; (▲) Humedad del sólido

Temperatura: La temperatura se ha medido en diferentes puntos del equipo por medio de termopares y un registro de plumilla que transforma la diferencia de potencial (mV) transmitida por dichos termopares a centímetros de desplazamiento de las plumillas. Los termopares empleados son del tipo K (NiCr/NiAl), cuyo campo de operación está comprendido entre -200 y 1000 °C), El registro utilizado es un modelo de Yokogawa Electric Work tipo 3066 2192, dispone de 3 canales independientes para la medida de temperaturas en puntos diferentes. Las características técnicas se muestran en la tabla 2.9.

El registro tiene un autocero, mediante el que se puede colocar el cero en distintas posiciones a lo largo del papel del registro. El registro muestra distintas sensibilidades de conversión, es decir, la señal de entrada (mV) se multiplica por dicha sensibilidad para calcular la longitud marcada dentro del registro, de forma que se pueden medir temperatura en un rango muy elevado, acorde con las especificaciones técnicas del termopar. Las medidas de las temperaturas, como se muestra en la Figura 2.6, se han realizado en cinco puntos: entrada del equipo, en dos puntos distintos situados del lecho fluidizado, en el lecho móvil y a la salida del equipo.



Tabla 2.9.- Características técnicas del registro de temperaturas.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL REGISTRO YEW TIPO 3066 2192

Voltaje (V)	100, 120, 200, 220, 240 ± 10
Consumo (VA)	31
Numero de canales	3
Exactitud de medida (%)	± 0.25
Banda muerta (%)	0.1
Velocidad de plumilla (m/s)	0.8
Sistema de impresión	TINTA
Temperatura de trabajo (°C)	5 - 40
Humedad de trabajo (%hr)	40 - 80
DIMENSIONES (mm)	376 x 437 x 154
PESO (kg)	11

Humedad relativa y temperatura del aire y temperatura de bulbo húmedo: Se ha utilizado un medidor TESTO modelo 635 con dos conexiones para sonda de temperatura y humedad. Los datos técnicos de dicho medidor se muestran en la tabla 2.10.

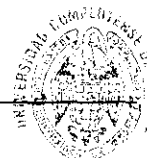
Tabla 2.10.- Características técnicas del medidor de humedad y temperatura

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MEDIDOR DE HUMEDAD Y TEMPERATURA

Resolución (%hr)	0.1
Resolución (temperatura °C)	0.1 (a +199°C) 1 (desde +200°C)
Temperatura de operación (°C)	0 a +50
Temperatura de almacenamiento (°C)	-20 a70
Visualizador	2 LINEAS DE LCD
Dimensiones (mm)	190x57x42
Peso (g)	300

Dicho medidor cuenta con una salida para impresora de la información mostrada por pantalla con fecha y hora de almacenamiento, además es capaz de almacenar los valores máximo y mínimo que se han mostrado dentro del proceso de medida.

El medidor dispone de una sonda 0636.2161 tipo %HR/°C. Los datos técnicos de dicho sensor se muestra en la tabla 2.11.





El instrumento de medida es capaz de mostrar la temperatura ambiente y a partir de ésta y la humedad relativa interpolar el valor de la temperatura de bulbo húmedo. Dicho instrumento esta de acuerdo con EN 50 081-1 + EN 50 082-1. Certificado con la norma ISO 9001.

Tabla 2.11.- Características técnicas del sensor de humedad/ temperatura
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR 0636.2161 TIPO %HR/°C

SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA	
Rango de medición (%h)	0 A 100
Exactitud	±0.03
SENSOR DE TEMPERATURA	
Campo de medición (°C)	-20 a 140
Exactitud	±0.4 (0 a +50°C) ±0.5 (desde +50°C)
Unidades de medida	°C Y °F

Humedad del sólido tratado (medida continua en línea): La humedad del sólido seco que sale del lecho fluidizado se ha medido mediante un sensor basado en el hecho de que la capacidad de un condensador es función de la proporción de agua contenida y que realiza el papel de dieléctrico. El sensor ha sido realizado dentro del proyecto IMPROLIVE por COGNITO QUAM Ltd., grupo de investigación colaborador de dicho proyecto y ha sido chequeado y probado dentro del presente trabajo. La medida de la humedad se basa en la diferencia que existe entre la capacidad del condensador tomando como dieléctrico el aire y la que presenta con diferentes porcentajes de agua en su interior.

Esta construido en teflón. Dicho material es no poroso y ligeramente hidrofílico, no presenta reactividad química con el sólido a medir y resiste temperaturas de operación hasta 250°C. Como se muestran en las Figuras 2.7 y 2.8, el sensor es una tubería de teflón de 0.03 m de diámetro interno por la que circula el sólido a medir. Alrededor de esta tubería están dispuestas dos placas de cobre que forman las placas del condensador.

La capacidad del condensador se mide mediante un circuito oscilatorio. La frecuencia del oscilador es como máximo de 50 kHz cuando el sólido está seco. El sistema va dotado de un transductor/transmisor que mide el período de esta frecuencia de oscilación con una resolución de microsegundos que puede ser enviada al ordenador a través de un puerto serie RS-232 y además,



como se muestra en la Figura 2.7 también es reflejada en una pantalla numérica instalada en el propio transmisor.

Las características del circuito oscilatorio se muestran en las tabla 2.12:

Tabla 2.12.- Características del transmisor de humedad
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL TRANSMISOR

CPU:	80C32 a 11059200 Hz
Memoria:	256 CPU, 32 Kibytes memoria externa, 32 Kibytes EPROM
Puerto Serie:	RS485/RS232
Bit salida	4
Bit entrada	8
Pantalla local	4 Dígitos

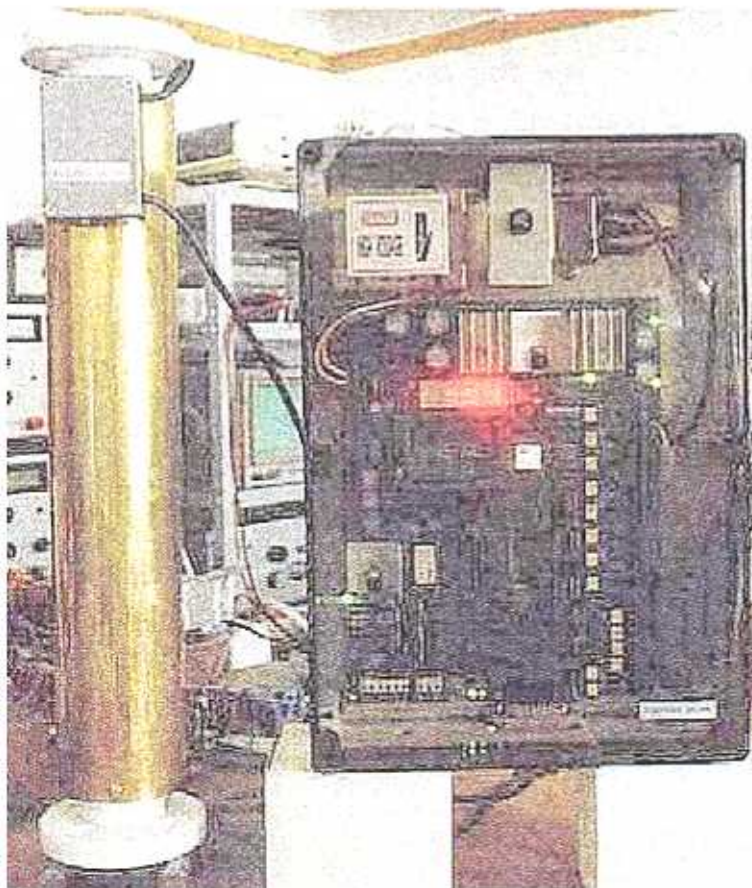


Figura 2.7.-Sensor de humedad (izquierda) y unidad de transmisión (derecha)

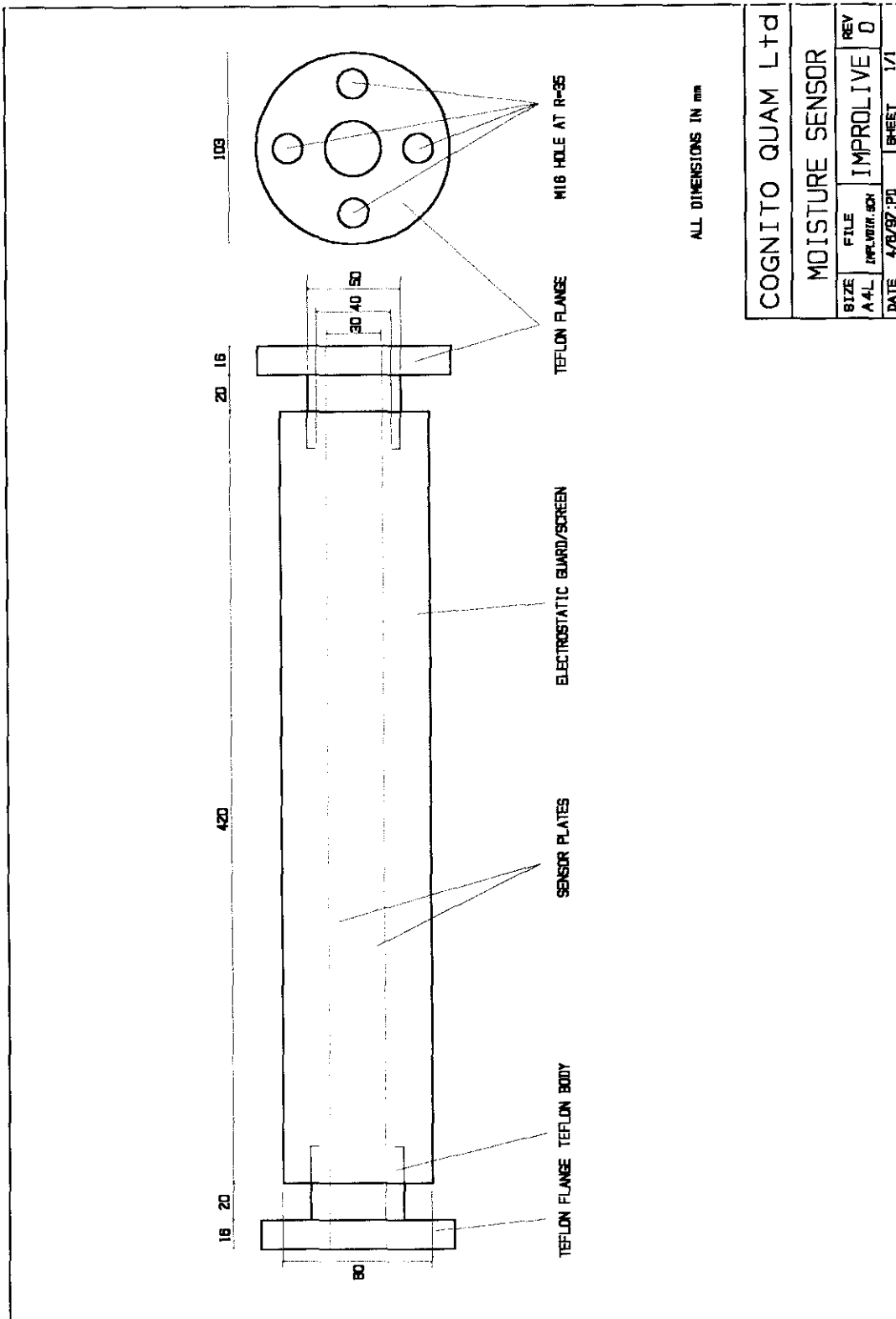


Figura 2.8.-Dimensiones del sensor de humedad



El sensor se ha calibrado con distintos sólidos de humedad prefijada. Dicha determinación se ha realizado haciendo pasar sólido de humedad conocida a través del sensor durante un tiempo. Por ello, el sensor muestra primero un aumento del período de oscilación pasa por un estado estacionario para alcanzar finalmente el mismo valor inicial, instante a partir del cual el sólido ha dejado de circular a través de él. En la Figura 2.9 se muestra a modo de ejemplo la variación del valor del período de oscilación con el tiempo para sólidos con diferentes humedades. Como se muestra en la Figura 2.9 el tiempo empleado por el sensor para proporcionar un valor estable de la humedad está comprendido entre 60 y 80 segundos.

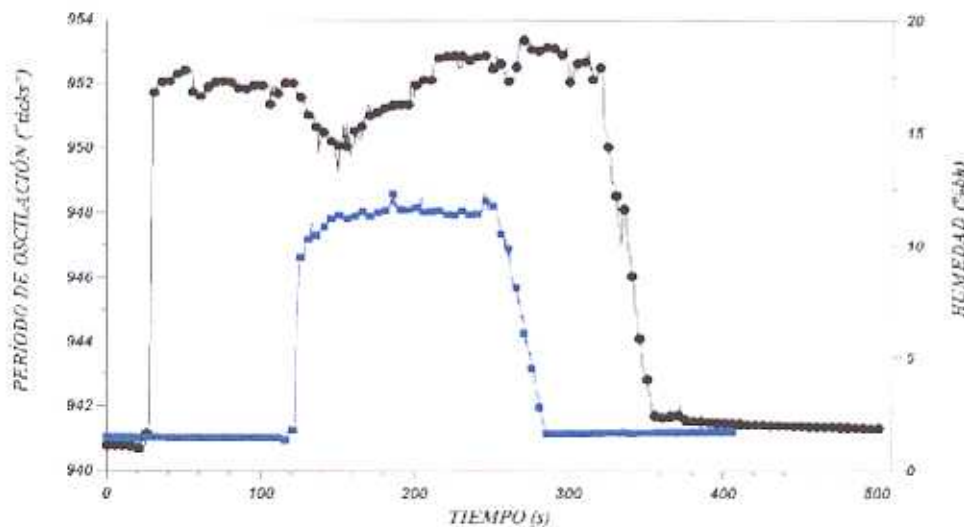


Figura 2.9.- Variación del período de oscilación en función de la humedad del sólido: (●) Humedad de sólido de 18.69%; (■) Humedad de sólido de 10.71%.
(1 ticks corresponde con 50 ms)

El medidor presenta un comportamiento lineal entre el período de oscilación y la humedad que presenta el sólido, Figura 2.10. Para la realización de la medida de la humedad y su frecuencia de oscilación se ha seguido la metodología operativa descrita en la explicación de la Figura 2.9.

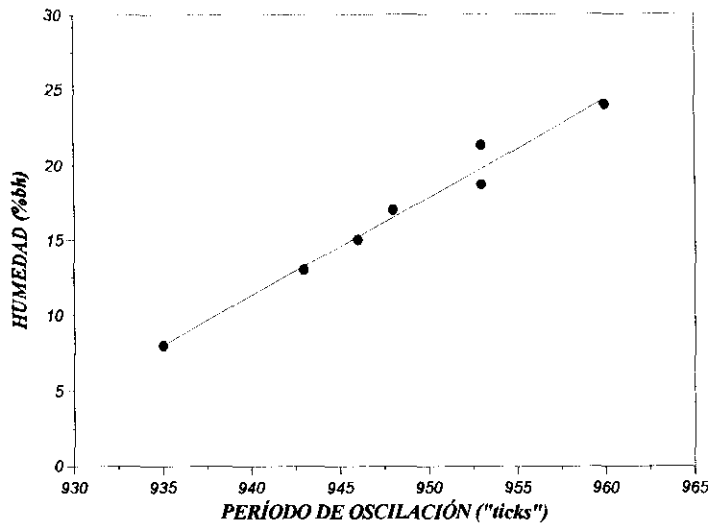


Figura 2.10.- Regresión lineal entre período de oscilación y la humedad del sólido.
(1 ticks corresponde con 50 ms)

La ecuación correspondiente a la recta de ajuste representada en la Figura 2.10 se muestra en la ec 2.4.

$$H = -602.67 + 0.65 \cdot fos \quad (2.4)$$

donde H es la humedad del sólido en base húmeda y *fos* representa el período de oscilación generada por el sensor de humedad. De esta forma se puede determinar el valor de la humedad mediante el período de oscilación del sensor.

Humedad del sólido (fuera de línea): Para la medida de la humedad de muestras del sólido se ha utilizado la norma UNE 55031. Para ello se utiliza el siguiente material:

Cápsulas de secado: las cápsulas de secado empleadas son tipo Petri con tapa de acero inoxidable 18/8. Dichas cápsulas tienen un diámetro interno de 0.06 m. y una altura de 0.02 m.

Estufa de desecación: Modelo IDL AI-36, con un volumen de 36 L, medidas útiles de 300×380×320 mm. Además, presenta las características mostradas en la tabla 2.13:



Tabla 2.13.- Características eléctricas de la estufa de desecación

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA ESTUFA DE DESECACIÓN	
Resistencia a tierra (Ohm)	0.1
Corriente a tierra (mA)	0.0
Resistencia de Aislamiento (MOhm)	1.5
Tensión de Arranque (V)	0.001
Corriente de Arranque (A)	7.5
Tensión de Funcionamiento (V)	220-230
Corriente de Funcionamiento (A)	5.45
Potencia de funcionamiento (W)	1250

Balanza: Para realizar las medidas de humedad fuera de línea se ha utilizado una balanza Gibertini modelo EUROPE 1000, cuyas características técnicas se muestran en la tabla 2.14.

Tabla 2.14.- Características técnicas de la balanza

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA BALANZA GIBERTINI MODELO EUROPE 1000	
Voltaje (V)	220 -15%/10%, con alimentador externo, 50 Hz
Consumo (VA)	14
Capacidad de pesada (g)	1000
Exactitud de medida (g)	± 0.01
Tiempo de estabilización (s)	2/3
Pantalla	7 DÍGITOS
Temperatura de trabajo (°C)	15 - 30
Temperatura funcional (°C)	10 - 40
Dimensiones (mm)	210x355x120
Peso (kg)	6.4.
Diámetro de plato (mm)	150
Linealidad (bit)	± 2
Interfase	RS232 I/O

La balanza es capaz de enviar la información recogida a un ordenador mediante interfaces serie RS232, las comunicaciones pueden ser en ambas direcciones, hacia y desde el ordenador o sólo desde el instrumento al ordenador. Los parámetros de comunicaciones se seleccionan dentro de este rango: Velocidad de transmisión de 75 a 9600 bit/s, paridad



PAR, IMPAR O NINGUNA, continua o en un modo seleccionado. Los parámetros iniciales de la balanza son 9600 bit/s, paridad IMPAR, 7 bit/palabra y 1 bit de parada.

Granatario para realización de mezclas: Para realizar las mezclas entre el orujo fresco y el seco en porcentajes definidos se ha utilizado una balanza KERN 440-53. 5000/1g, cuyas características técnicas se muestran en la tabla 2.15.

Tabla 2.15.- Características técnicas del granatario.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA BALANZA KERN MODELO 440-53	
Voltaje (V)	9 AC
Consumo (VA)	1.08
Capacidad de pesada (g)	5000
Exactitud de medida (g)	± 1
Tiempo de estabilización (s)	2
Pantalla	4 DIGITOS
Temperatura de trabajo ($^{\circ}$ C)	10 - 45
Dimensiones (mm)	165x230x80
Peso (kg)	2.1
Dimensiones del plato (mm)	150x170

2.3.6.- Sistemas de control

El sistema de control que se describe en este apartado ha sido probado en una instalación de dimensiones semejantes a las descritas anteriormente en el apartado 2.3.3. El sistema de control del secadero está compuesto por tres lazos cerrados e independientes entre sí y un indicador de humedad mostrados en la Figura 2.11. A continuación se muestra con más detalle cada uno de los lazos mencionados:

Control del caudal de aire: Se ha utilizado un controlador de flujo másico (MFC o Mass Flow Controller), las características más sobresalientes se muestran en la tabla 2.16. Dicho controlador es un instrumento de precisión empleado habitualmente para el control del caudal másico de gases. Básicamente se puede dividir en dos componentes principales: Un medidor de flujo másico por conductividad térmica y un controlador automático. El medidor de flujo másico trabaja dividiendo el flujo o corriente de gas entre un tubo sensible, que es donde se lleva a cabo la medición del caudal, y una restricción de paso con by-pass por donde pasa la mayor parte del flujo del gas. El by-pass desvía un 1% del flujo



que entra en el MFC hacia el sensor. La electrónica del medidor de flujo másico amplifica la señal producida por el sensor y a partir de ella se elabora la señal de salida de 0 a 5 voltios que es proporcional al flujo másico del gas.

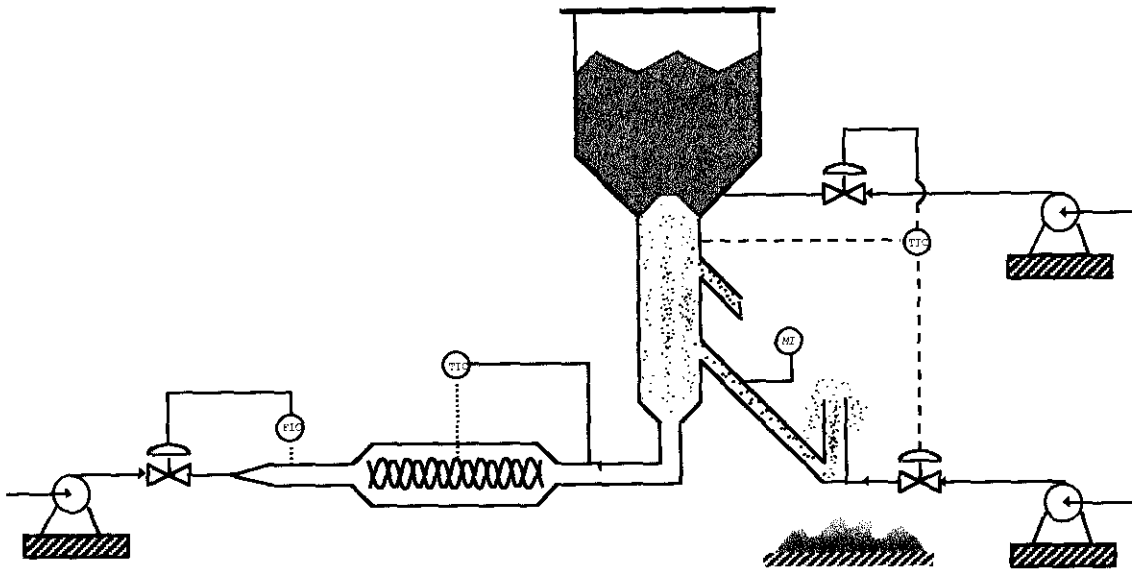


Figura 2.11.- Esquema de los lazos de control del secadero

Tabla 2.16.- Características del controlador de flujo másico (a 0° C, 1 Atm)
CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR DE FLUJO MÁSCICO

Rango de caudales (L/s)	4
Precisión	±1%
Linealidad	±0.5%
Repetitividad	±0.2%

El otro componente fundamental está formado por un controlador automático del flujo másico. La electrónica del sistema medido y controlado se encuentran en el mismo circuito impreso. Mediante un sistema analógico de voltaje se le comunica al MFC el valor de consigna del flujo másico que se requiere. La diferencia entre la señal de salida proporcionada por el medidor y la señal de entrada introducida como punto de consigna, es la que se utiliza para proceder a la apertura adecuada de la válvula. La diferencia de voltajes es analizada mediante un circuito comparador de alta ganancia. Dependiendo de la señal de salida del comparador la válvula de control se abrirá o cerrará proporcionalmente hasta que



el voltaje de salida (caudal másico medido) sea igual al voltaje del punto de consigna (caudal másico deseado).

La acción de control del MFC es PID (Proporcional-Integral-Diferencial). Para flujos bajos es deseable incluir la acción diferencial, ya que proporciona un tiempo de respuesta más rápido y no se produce sobrepasaje en la salida de la válvula.

La válvula de control es una válvula proporcional, similar en su forma a una válvula solenoide, dotada de una resolución elevada. La posición normal de la válvula cuando no está en funcionamiento es cerrada. Cuando la válvula recibe una señal de 0 V, procedente de la electrónica de control, se encontrará en la posición cerrada, (esta función se puede regular con un autocero) y si recibe una señal de 5 V la válvula estará completamente abierta.

Control de la temperatura del aire de entrada: La medida se realiza mediante un termopar tipo K de características semejantes a las mencionadas en el apartado 2.3.5. El controlador es de acción PID al que exteriormente se introduce un valor del punto de consigna correspondiente al lazo de control al que se refiera. En base a la diferencia entre el valor real y el valor del punto de consigna, y mediante la acción de control PID, se manda una actuación en forma de intensidad al actuador, que está compuesto por una resistencia que de una forma convectiva aporta energía al fluido que circula a su través. Para controlar la temperatura del aire se manipula un calefactor de circulación WATLOW modelo CBEN24G6-21 de aire cuyas características se muestran en la tabla 2.17, para el control de la temperatura del lecho se manipula el voltaje suministrado a una resistencia Thermocoax Crioterm modelo ZEZA30, las principales características de dicha resistencia se muestra en la tabla 2.18.

Tabla 2.17.- Características del calefactor de circulación

CARACTERÍSTICAS DEL CALEFACTOR WATLOW CBEN24G6-21	
Voltaje de trabajo (VAC)	240 (1 FASE)
Potencia calefactora (kW)	2
Material de construcción	2-INCALOY
Dimensiones (mm)	L=829, Ø=95
Peso (kg)	14



Tabla 2.18.- Características del Thermocoax Crioterm

CARACTERÍSTICAS DEL THERMOCOAX CRIOTERM MODELO ZEZA30C	
Voltaje de trabajo (VAC)	240
Potencia calefactora (kW)	1
Resistencia (Ohm/m)	1.4
Material de construcción	ACERO INOXIDABLE
Diámetro (mm)	3
Longitud de la resistencia calefactora (m)	1.5
Longitud de extremo frío (m)	1

Control de la temperatura del lecho: La medida se realiza mediante un termopar tipo K, descrito en el apartado 2.3.5, y la acción de control es todo-nada, actúa sobre una electroválvula tipo WKB 5377 descrita en el apartado 2.3.3. Dicha acción de control se activa cuando la temperatura del lecho es inferior a la temperatura de consigna. Esta acción provoca la alimentación de orujo presecado del lecho móvil al fluidizado, apartado 2.3.2. y provoca la descarga de orujo seco del lecho fluidizado, apartado 2.3.3.

Indicador de la Humedad: Esta compuesto por un sensor y una unidad de transmisión según se detalla en el apartado 2.3.5. La humedad es mostrada en una pantalla insertada en la unidad transmisión, tal y como se muestra en la figura 2.7.



2.4.-DESCRIPCIÓN DE UN EXPERIMENTO

El proceso operativo de un experimento típico se puede desglosar en las siguientes etapas, ordenadas en orden cronológico:

1. Preparación del material a secar
2. Puesta en marcha y desarrollo de un experimento

2.4.1.- Preparación del material a secar

El producto a secar, como se señaló anteriormente, presenta unas características físicas (humedad, viscosidad, etc.) que hacen difícil el tratamiento. Por ello, como paso previo al secado, debe ser mezclado el orujo fresco (humedad aproximada del 65 %) con el orujo seco (a la humedad de equilibrio en condiciones ambientales), en las proporciones que se estudian y optiman posteriormente. De esta forma se produce un orujo húmedo (humedad entre el 30 y 55 %) que es tratable en lecho móvil y lecho fluidizado, desde el punto de vista fluidodinámico.

2.4.2.- Puesta en marcha del sistema y desarrollo de un experimento

La puesta en marcha del secadero está compuesta por varios pasos, que se describen a continuación:

1. Partiendo del secadero vacío, se hace pasar un caudal de aire frío (temperatura ambiente) de forma que la velocidad del gas en el interior del secadero es superior a la de completa fluidización del sólido a secar.
2. Cuando se ha alcanzado el caudal de aire adecuado, se comienza el aporte energético a dicho aire mediante el sistema de calefacción descrito en el apartado 2.3.4.
3. Una vez alcanzado un estado estacionario de temperatura de las condiciones de operación fijadas en el secadero, se carga el éste con 300 g de orujo seco, para formar un lecho fluidizado de unos 0.25-0.30 m de altura. El sólido alimentado tiene un diámetro de partícula menor de 1 mm, obtenido mediante tamizado de un orujo seco. Este diámetro de partícula se utiliza con el fin de alcanzar unas condiciones fluidodinámicas adecuadas



para la correcta fluidización del sólido a tratar, y por tanto el adecuado contacto sólido-gas, con una velocidad del fluido intermedia evitando de esta forma lo más posible el arrastre del sólido y garantizando una calidad adecuada del estado fluidizado del lecho.

4. Cuando todo el lecho fluidizado ha alcanzado las condiciones adecuadas y uniformes de temperatura y fluidización, se carga gradualmente el lecho móvil con sólido húmedo. Posteriormente, se va descargando paulatinamente el sólido seco introducido inicialmente y se va alimentando sólido presecado del lecho móvil al lecho fluidizado. En estos momentos se considera que la puesta en marcha ha sido efectuada y se prosigue según se indica a continuación.

Durante el secado, el sistema de control evalúa la humedad del sólido y la temperatura del lecho. En función de estas dos variables, se descarga el sólido seco y se va alimentando sólido presecado al lecho fluidizado.

La alimentación de sólido presecado desde el lecho móvil al fluidizado se realiza mediante disparos de aire a presión en puntos repartidos homogéneamente en la parte tronco-cónica del lecho móvil, como se puede observar en la Figura 2.5 y se describe en el apartado 2.3.3. Estos disparos son controlados en función de la humedad del sólido de salida y la temperatura del lecho fluidizado. Dichos disparos serán activados siempre que la temperatura del lecho sea mayor que el punto de consigna y que la humedad del sólido a la salida del lecho fluidizado sea menor que la requerida.

La alimentación al lecho móvil se realiza desde el recipiente superior descrito en el apartado 2.3.2. y por gravedad. La descarga de sólido seco se realiza con la ayuda de una válvula J y aire a presión (4 kg/cm^2). Como se explica en el apartado 2.3.2, mediante disparos de aire, el sólido seco va siendo descargado del lecho fluidizado. El caudal medio de sólido seco descargado por dicha válvula, con el fin de mantener la continuidad dentro de la operación de secado, es de aproximadamente 2 kg/h .

A lo largo del experimento, se toman muestras de sólido seco con el objetivo de medir su humedad fuera de línea y verificar de esta forma tanto la labor del sensor de humedad como el funcionamiento global del proceso de secado. Para tomar dichas muestras, se utiliza la salida inferior de las dos de las que dispone el secadero en la parte de lecho fluidizado, Figura 2.5. La salida superior se utiliza para extraer muestras más ricas en finos del lecho fluidizado.



Cuando todo el sólido dentro del recipiente superior y del lecho móvil ha sido alimentado, se termina de tratar el sólido que queda dentro del lecho fluidizado. Cuando el secadero esta totalmente vacío, se corta el aporte energético, manteniendo la circulación de aire hasta que la temperatura a la entrada del secadero oscila entre 35-40°C, en este momento se corta el aporte de aire y se desconectan las tomas de aire de alimentación y descarga del sólido.

3.- ESTUDIO FLUIDODINÁMICO



3.- ESTUDIO FLUIDODINÁMICO

Como ya se ha mencionado en el apartado 2.2.2, el orujo es un material cuyas características físicas (densidad, viscosidad, humedad, etc.) originan elevada dificultad, complejidad y bajo rendimiento energético en los tratamientos a los que es sometido. Debido a ello, se han realizado una serie de experimentos en los que se estudian aspectos relacionados con:

- **Caracterización fluidodinámica**, donde se determinan: diámetro de partícula, distribución de tamaños, pérdida de carga del gas, ángulos de fractura y velocidades características de fluidización.
- **Alimentación de orujo y descarga del sólido seco** donde se estudian distintos sistemas de alimentación orientados a conseguir una alimentación en continuo del secadero.
- **Porcentaje de mezcla** donde se acotan las proporciones de orujo húmedo y seco del sólido a tratar, con el objeto de obtener un sólido con unas características fluidodinámicas adecuadas para su posterior secado en el secadero de lecho fluidizado/móvil.

3.1.- FLUIDODINÁMICA DEL PRODUCTO

Los parámetros fluidodinámicos son críticos a la hora de realizar cálculos de diseño de los contactores de lecho fluidizado/móvil. De su valor depende la calidad de la fluidización, y con ello el contacto sólido-gas. Se han analizado aspectos tales como: diámetro de partícula, distribución de tamaños, pérdida de carga, altura y expansión del lecho, velocidades de fluidización y porosidad del lecho.

3.1.1.- Caracterización del Sólido

El diámetro de partícula es importante ya que la relación masa-superficie externa del sólido es función de esta variable, y esta relación es un parámetro fundamental dentro de cualquier proceso de secado donde la transmisión del calor se realiza principalmente por convección. Por otra parte,



desde el punto de vista fluidodinámico, este parámetro influye también sobre las velocidades de fluidización, porosidad del lecho, pérdida de carga, etc.

Como se ha indicado en el apartado 2.2, el orujo es un sólido húmedo con aspecto fangoso por lo que se debe tener en cuenta que el diámetro de partícula es únicamente medible por análisis de tamizado ordinario cuando el material está seco. Por otro lado, se puede considerar que el diámetro medio de partícula se mantiene aproximadamente constante en el intervalo de humedades a las que el sólido es fluidizable, es decir, las partículas dentro del lecho fluidizado presentan el mismo tamaño medio durante la operación e igual que a la salida del mismo. En la tabla 3.1 se muestran los diámetros de partícula medios de orujo seco que tiene una humedad prácticamente igual a la humedad de equilibrio ambiental con aire a 20°C y 45% de humedad relativa. Las muestras a las que se alude en dicha tabla, se refieren a orujo extraído en diferentes partes del proceso productivo del aceite. La muestra 1 corresponde a un orujo parcialmente deshuesado obtenido después de la etapa de molturación de la aceituna, la muestra 2 procede de un tipo de orujo semejante al de la muestra 1 pero que ha sido sometido a un proceso de agotamiento por centrifugación, la muestra 3 corresponde a un orujo obtenido después de la etapa de molturación de la aceituna y sin que haya sido sometido a ningún proceso de deshuesado. Como se puede apreciar en dicha tabla, la muestra 1 y la 2 presentan un diámetro de partícula semejante, esto es debido a que entre ellas ha habido un proceso de agotamiento del orujo, no afectando éste al diámetro de partícula, en cambio en la muestra 3, al estar compuesto el orujo por un alto porcentaje de hueso molido generado en la etapa de molturación, y teniendo en cuenta que éste presenta un diámetro de aproximadamente de 3.5 mm, el diámetro medio de partícula de la muestra es mayor.

Tabla 3.1.- Diámetro medio de partícula
 (1) Después del primer decantador, (2) Después del segundo decantador,
 (3) Orujo rico en hueso

MUESTRA	DIÁMETRO DE PARTÍCULA MEDIO(mm)
1	0.70
2	0.72
3	1.04



Distribución de tamaños de partícula: Con este término se define la proporción en peso de los distintos diámetros de partícula que hay en el sólido seco analizado. Esta distribución de tamaños da una información útil para caracterizar el sólido y ajustar las condiciones de operación del secado.

En la Figura 3.1 se presenta la distribución de tamaños de cada una de las muestras aludidas en la Tabla 3.1. Se puede observar que la fracción de pesos mayoritaria está localizada en el intervalo $+0.25 -1.75$ mm, para las tres muestras. Como se ha comentado anteriormente, las muestras 1 y 2 se diferencian únicamente en la operación física de centrifugación o agotamiento al que se vio sometido el sólido de la muestra 1 para generar el de la muestra 2. De acuerdo con los resultados, esta operación no afecta notablemente a la distribución de tamaños de partícula. La distribución de tamaños que se muestra en la Figura 3.1. correspondiente a la muestra 3 es más homogénea que las anteriores, esto es debido a que la muestra 3 tiene un alto porcentaje de hueso, por ello la fracción de partículas con diámetros inferiores a 1 mm es menor que en las muestras 1 y 2, mientras que es mayor la fracción de partículas con diámetros entre 3 y 4 mm.

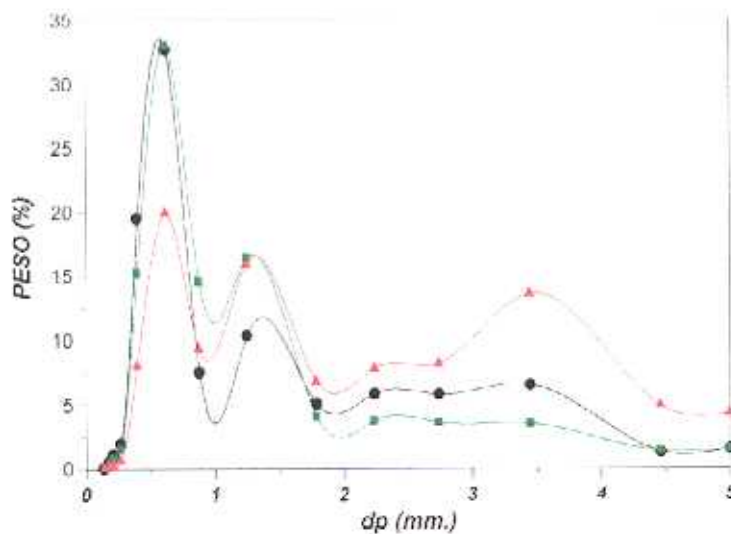


Figura. 3.1.- Distribución de tamaños de partícula:
(●) Muestra 1; (■) Muestra 2; (▲) Muestra 3

La distribución de tamaños de partícula del sólido a secar influye notablemente en el rendimiento energético de la operación de secado. Cuando el sólido a secar presenta una distribución de tamaños de partícula en la que predomina la proporción de partículas de pequeño diámetro, el rendimiento energético es mayor que si en el sólido predomina la proporción de



partículas de gran diámetro, debido a que en el primer caso la velocidad del gas necesaria para la fluidización es baja y la superficie de evaporación que presenta el sólido es elevada. Por ello, sólidos con una distribución de tamaños semejante a la muestras 1 y 2 presentan ventajas para el secado frente a muestras con una distribución semejante a la 3. De cualquier forma, la distribución de tamaños al final de la operación de secado viene fijada tanto por las variables propias del secado tales como la temperatura, grado de mezcla, etc., aspectos que se tratarán posteriormente, como por las condiciones externas al proceso de secado tales como el tiempo de almacenamiento previo al secado, condiciones de producción del orujo (decantadores de dos o tres fases), etc.

En la Figura 3.2. se muestra la distribución de tamaños de partícula de un orujo, secado en un lecho fluidizado hasta dos humedades diferentes: 11.21 y 8.16%. Estas diferencias de humedad significan un mayor tiempo de permanencia del sólido de humedad 8.16% dentro del lecho fluidizado. Si se realiza un análisis comparado de las dos distribuciones se obtienen las siguientes conclusiones:

- La fracción de partículas con diámetro inferior a 1 mm es la mayoritaria en ambos orujos y no se ve prácticamente afectado por el grado de secado.
- La fracción cuyo diámetro de partícula se encuentra comprendido entre 1 y 2 mm es algo mayor en el orujo con un 11.21% de humedad. Esto es debido a que a lo largo de la operación de secado, debido al contacto que tiene lugar dentro del lecho fluidizado, se producen impactos de partículas entre sí y de éstas con las paredes del lecho, lo que produce una disminución del diámetro de las partículas, éstas están fundamentalmente compuesta por la pulpa del sólido a secar, aumentando el porcentaje de finos dentro del lecho. El orujo secado al 8.16% ha permanecido más tiempo en el secadero y por tanto se ha producido un mayor grado de desgaste de la pulpa, aumentándose el porcentaje de sólido con menor diámetro.
- La fracción de diámetro de partícula comprendido entre 2 y 5 mm. se debe a la presencia de hueso triturado formando parte del orujo y que no se ve modificada, durante la operación de secado, debido a la dureza que presenta el endocarpio.

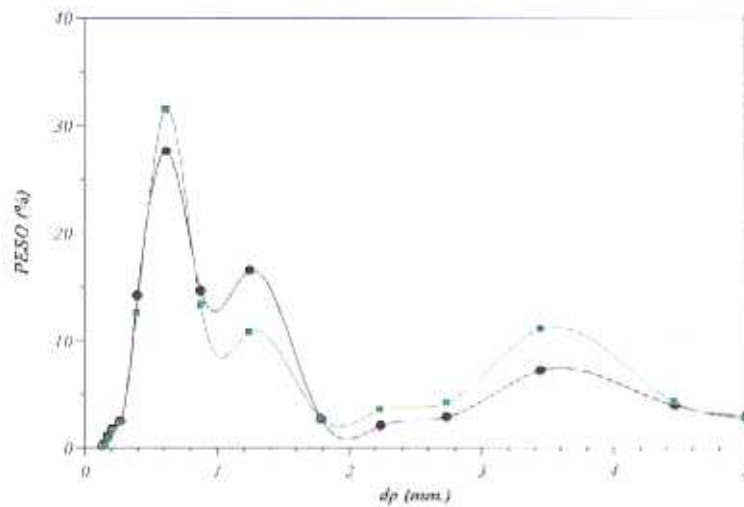


Figura 3.2.- Distribución de tamaños para diferentes humedades:
(●) 11.21% (■) 8.16%

3.1.2.- Pérdida de carga del secadero de lecho fluidizado/móvil

La determinación de la pérdida de carga que experimenta un gas al atravesar cualquier tipo de contactor de lecho fluidizado sólido-gas es fundamental en su diseño, ya que tienen lugar transferencias de energía y de materia, y el gas debe circular con una velocidad adecuada tanto para llevar a cabo dichas transferencias como para que el sólido a tratar sea fluidizado. Por otro lado, una mayor pérdida de carga en el lecho implica un mayor gasto energético en la impulsión del gas.

En la Figura 3.3. se muestra el secadero objeto de la presente investigación, indicándose la localización de cada uno de los lechos dentro del mismo. Se realizan dos medidas de presión referidas a la presión atmosférica: una en la base del lecho fluidizado y otra en la base del lecho móvil. Asimismo se realiza una medida de la diferencia de presiones entre ambos puntos.

La pérdida de carga que sufre el aire a través del lecho fluidizado y del lecho móvil depende del diámetro medio de partícula, velocidad del fluido, porosidad, densidad del sólido y altura de cada lecho. La pérdida de carga originada por el distribuidor depende de las características de éste: superficie libre de paso, distribución, cantidad y diámetro de los orificios.

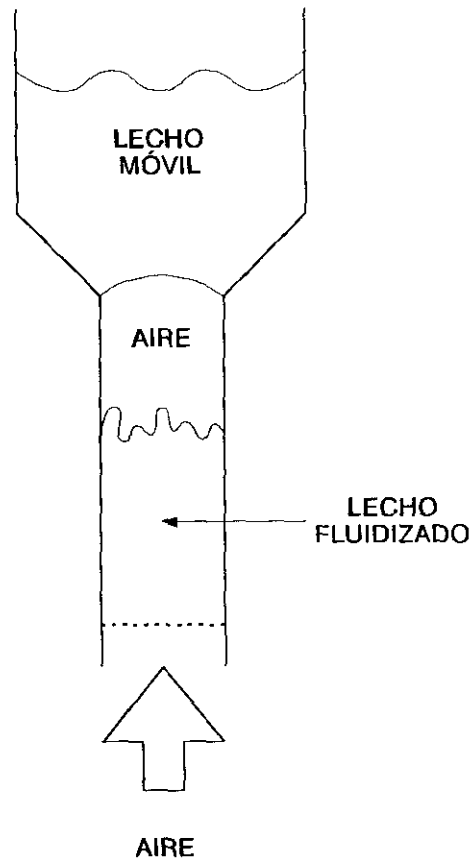


Figura. 3.3.- Representación del secadero de los lechos fluidizado y móvil

En la Figura 3.4 se muestra la pérdida de presión en el secadero frente a la velocidad superficial del aire a nivel del distribuidor. El sólido utilizado es orujo de $d_{pm} \approx 1$ mm y la temperatura de operación es la ambiental (22 °C). El lecho fluidizado contiene distintas cantidades de orujo entre 150 y 500 g, indicadas en la Figura 3.4.

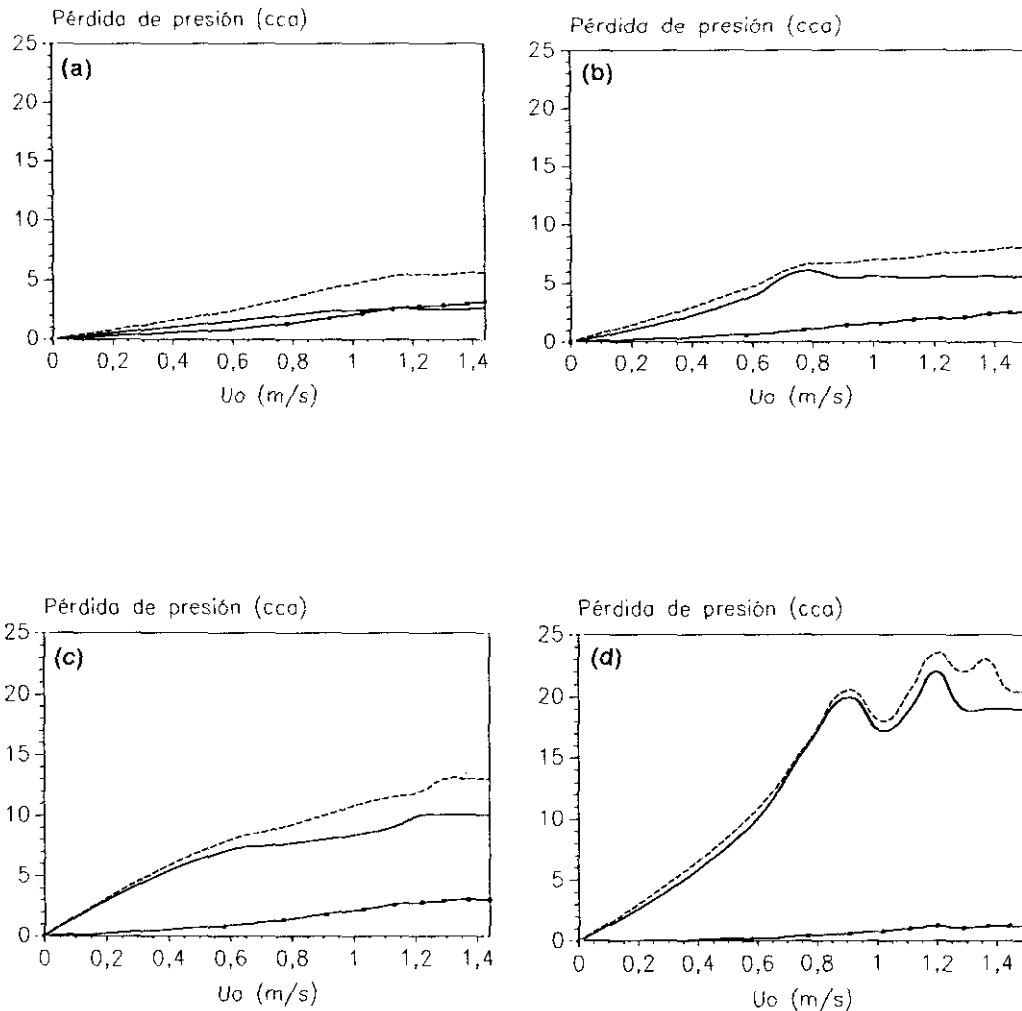


Figura. 3.4.- Pérdidas de presión en función del sólido presente en el lecho, presión de entrada del aire 4 kg/cm^2 , temperatura de operación 22°C , masa de lecho: (a) 150 g, (b) 250 g, (c) 350 g, (d) 500 g

Se representa la presión en la base del lecho móvil (zona tronco-conica) (■), en línea continua se representa la presión diferencial entre los lechos fluidizados y móvil y en línea discontinua se representa la presión en la base del lecho fluidizado. Comparando los valores de pérdidas de presión de cada una de las gráficas que componen la Figura 3.4, como era de esperar, existe una gran dependencia entre la pérdida de carga y el peso de sólido en el lecho. Dicha dependencia es utilizada, en la operación de secado dentro del lecho fluidizado/móvil, para



determinar aproximadamente el peso de sólido presente en el lecho fluidizado, dicho aspecto se tratará a continuación.

En la Figura 3.5 se muestra la pérdida de presión del aire frente a la masa de sólido en el lecho, la velocidad de paso del fluido era de 1.4 m/s, velocidad adecuada para conseguir un estado fluidizado. En dicha figura se muestra también la pérdida de presión del lecho fluidizado (cociente entre el peso de sólido y la sección del lecho) y la pérdida de presión en la base del lecho móvil (zona tronco-cónica del secador).

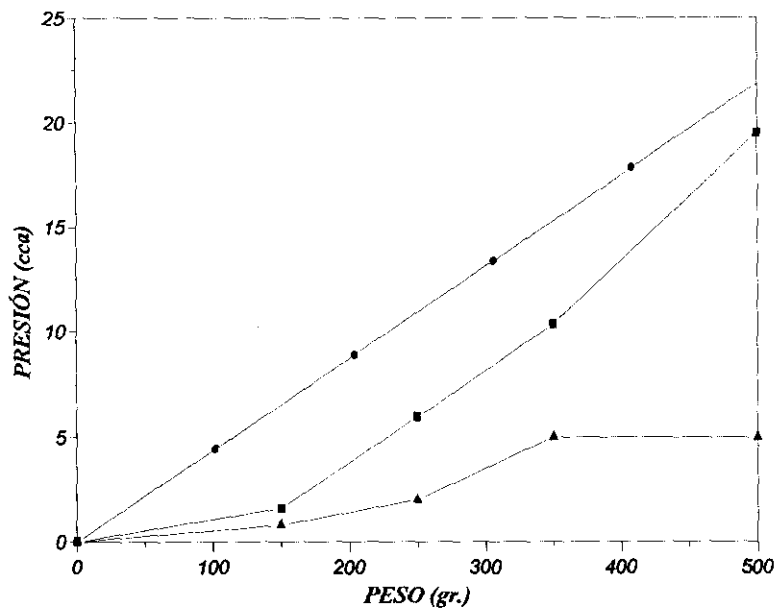


Figura. 3.5.- Pérdidas de presión en función del peso de sólido ($u_0=1.4$ m/s):
(●) Teórica; (■) Lecho fluidizado; (▲) Lecho fijo

Como se aprecia en la Figura 3.5, existe una dependencia entre la pérdida de presión del lecho fluidizado y la cantidad de sólido que se encuentra en el mismo, de esta forma, en condiciones de operación semejantes, podemos estimar la cantidad de sólido dentro del lecho fluidizado. Esta variación ha sido usada a lo largo de la experimentación de secado para la determinación aproximada de la cantidad de orujo que se estaba tratando en cada instante y la cantidad de sólido pre-secado que se alimentaba al lecho fluidizado desde el lecho móvil en cada pulso de aire a presión en la zona tronco-cónica.



3.2.- VELOCIDADES DE FLUIDIZACIÓN Y POROSIDAD DEL LECHO

Como se ha comentado en apartados anteriores, el estado fluidizado es consecuencia de un equilibrio de fuerzas entre el fluido ascendente y el peso del sólido. En un lecho fluidizado el sólido se encuentra suspendido en el aire ascendente y el contacto sólido-gas que se produce es adecuado para transmisión tanto de energía como de materia. El estado fluidizado se produce a partir de una determinada velocidad del fluido, denominada velocidad de mínima fluidización. Por encima de esta velocidad existe un margen de velocidades, de 1.5 a 2 veces la velocidad de mínima fluidización hasta alcanzar la velocidad mínima de completa fluidización, para la cual el lecho se encuentra perfectamente fluidizado. Si la velocidad del fluido ascendente aumenta, se puede alcanzar la llamada velocidad de arrastre o terminal, que representa la velocidad para la cual el lecho es arrastrado por el aire. Es deseable que la velocidad mínima de completa fluidización sea lo más baja posible, ya que de esta forma el gasto energético necesario para mover el fluido es de igual forma reducido. Para obtener un buen funcionamiento del lecho fluidizado y un buen contacto sólido-gas es necesario que la velocidad del fluido ascendente esté comprendida entre la velocidad mínima de completa fluidización y la velocidad terminal o de arrastre.

La porosidad es una propiedad del sólido que depende tanto de las propiedades fluidodinámicas del lecho (compactación del lecho, velocidad de mínima fluidización, distribución de tamaños, etc.) como de las características del sólido (tamaño y forma de las partículas, tipo de partículas, humedad interparticular, etc.). Dicha porosidad aumenta con la velocidad del aire en el lecho puesto que al aumentar la fuerza de arrastre del fluido las partículas están más separadas entre sí. Cuando se alcanza la velocidad de mínima fluidización se alcanza el estado denominado de porosidad de mínima fluidización. En este estado, las partículas se encuentran suspendidas en el fluido ascendente, presentando una porosidad mayor que en el estado fijo anterior y por ello el contacto sólido-gas es mejor y mejoran la transferencia de energía y de materia.

La porosidad del lecho se ha calculado a través de medidas experimentales de alturas de sólido y pérdidas de presión en lecho fijo retacado (L_{fijo}), y en lecho en mínima fluidización (L_f). Las pérdidas de presión en la base del lecho para cada uno de los estados son reflejados como subíndices (mínima fluidización ΔP_f , fijo ΔP_{fijo}). Mediante la ec. 3.1 se calcula la porosidad del lecho en el estado de mínima fluidización:



$$\epsilon_f = \frac{\frac{L_{mf}-1}{L_f}}{\frac{L_{mf}}{L_f} - 3 \sqrt{\frac{L_{mf} \Delta P_{mf}}{L_f \Delta P_f}}} \quad (3.1)$$

sustituyendo el valor de ϵ_f en la ec 3.2 se puede calcular la porosidad del lecho en cualquier estado de fluidización ϵ_x :

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{(1-\epsilon_{mf})}{(1-\epsilon_f)} \quad (3.2)$$

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.2.

En la tabla 3.2 se muestran las velocidades de mínima fluidización (u_{mf}) y terminal (u_t), y las porosidades extremas dentro del lecho: retacado ($\epsilon_{retacado}$) porosidad correspondiente al lecho fijo y aflojado ($\epsilon_{aflojado}$) correspondiente al estado de mínima fluidización, para tres fracciones diferentes de un mismo orujo seco.

Tabla 3.2.- Diámetro medio de partícula, velocidades de fluidización y porosidades del lecho

dp (mm)	-5 +1.6	-1.6 +0.25	-0.25 +0.08
dp_m (mm)	2.600	0.690	0.127
u_{mf} (m/s)	0.750	0.132	0.012
u_t (m/s)	>1.1	>1	>0.04
<i>Eretacado</i>	0.50	0.37	0.29
<i>Eaflojado</i>	0.60	0.42	0.35

En la Figura 3.6 se muestra la distribución de tamaños más representativa del orujo secado en lecho fluidizado. Como se puede observar, el intervalo de tamaños de partícula de dicho sólido está fundamentalmente comprendido entre 0.25 y 5 mm. Tomando como base la distribución de tamaños y las velocidades de mínima fluidización y terminales mostrados en la tabla 3.2, se ha



estimado un valor representativo de la velocidad de mínima fluidización de 0.2 m/s y una velocidad de trabajo óptima comprendida entre 1.4 y 1.5 m/s. Para esta velocidad de fluidización muchas partículas inferiores a 0.25 mm serán arrastradas por el fluido ascendente llegando al lecho móvil, de mayor sección, donde muchas partículas, debido a la disminución de la velocidad del aire, dejan de ser arrastradas, y todas las partículas quedan retenidas, para posteriormente ser alimentadas de nuevo al lecho fluidizado. La realimentación de partículas de pequeño diámetro al lecho fluidizado aumenta la probabilidad de que éstas se adhieran al sólido húmedo y acaben siendo descargadas del lecho fluidizado como sólido seco.

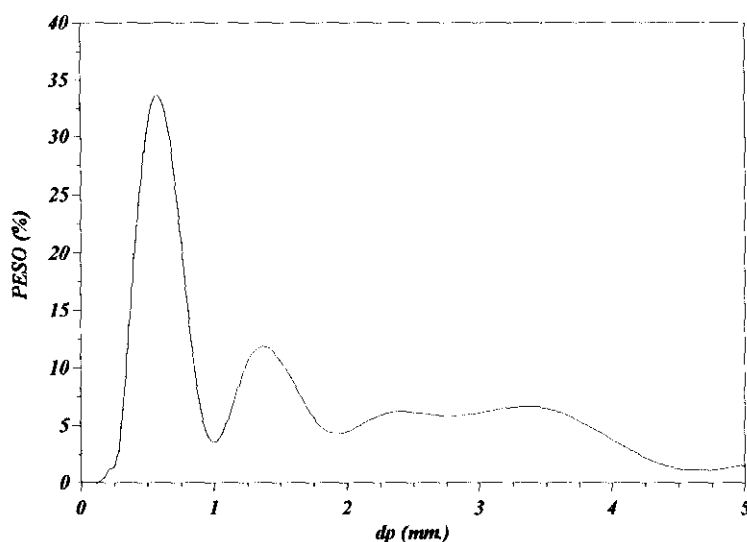


Figura 3.6.- Distribución de tamaños de partícula de orujo fresco secado en lecho fluidizado ($d_{pm} = 0.7$ mm.)

En los experimentos de secado de orujo en lecho fluidizado/móvil se ha evaluado la retención del sólido de pequeño diámetro por el lecho móvil. El arrastre del sólido fuera del secadero se ha medido con separadores ciclónicos dispuestos en la salida de dicho secadero, que previamente han sido verificados en cuanto a su calidad de retención de finos. La cantidad retenida por estos separadores y por tanto el sólido que no ha sido capaz de ser retenido por el lecho móvil es del orden de sólo el 0.01% del total del sólido tratado en cada experimento (por ejemplo, 0.5 gr. de finos recogidos después de tratar 5 kg. de orujo húmedo).

La retención de sólidos de pequeño diámetro efectuada por el lecho móvil es una de las indiscutibles ventajas del secadero de lecho fluidizado/móvil. La fluidodinámica del secadero está



basada en la relación de diámetros entre el lecho fluidizado y el móvil. En el presente caso dicha relación es de 3.5. Esta relación de diámetros permite mantener una zona fluidizada y otra fija, con una alimentación en continuo del orujo presecado del lecho móvil al lecho fluidizado.

3.3.- PORCENTAJE DE MEZCLA

La mezcla entre el orujo seco y fresco condiciona las propiedades físicas del sólido a tratar (humedad, etc.), influyendo con ello en el contacto sólido-gas y por esto en la transferencia de materia y energía dentro de la operación de secado.

En los experimentos realizados se ha puesto de manifiesto que las características físicoquímicas del orujo fresco no permiten conseguir una alimentación continua, uniforme y homogénea de este producto al secadero. Asimismo no es posible conseguir una buena calidad de fluidización y un buen grado de mezcla en el lecho debido al alto contenido en agua y azúcares, tabla 1.3.

Por ello, el secado del orujo requiere una etapa previa de mezclado. En ella, se mezclan orujo fresco de una humedad del 60-65% con orujo seco. El grado de humedad y la composición química del orujo antes de la etapa de secado, no es un parámetro a ajustar, puesto que éstos son características propias del producto fresco a tratar. Lo que puede y debe ser optimado previamente es el porcentaje de mezcla, definido como el porcentaje de orujo fresco utilizado en la mezcla previa al secado. Por ejemplo, una mezcla de 70 gr de orujo fresco con 30 gr de seco tendría un porcentaje de mezcla del 70%.

La operación de mezclado mejora la manejabilidad y las propiedades fluidodinámicas del orujo fresco, lo que se traduce en un mayor aprovechamiento energético en el proceso de secado. Sin embargo, esta operación requiere un trabajo mecánico para el movimiento del orujo, que disminuye el rendimiento energético global del proceso de secado. Además, cuando se seca el orujo húmedo, se pierde parte de la energía aportada al secadero en volver a aumentar la temperatura del sólido seco que forma parte de la mezcla de alimentación.

Se pueden distinguir dos porcentajes de mezcla extremas:

Mezcla rica en orujo fresco: Cuando la mezcla es rica en orujo fresco, el sólido húmedo generado está menos particularizado y por lo tanto la superficie de contacto es menor. Por



otro lado, la energía que se emplea dentro de la etapa de secado es aprovechada fundamentalmente en la deshidratación del sólido húmedo y sólo un pequeño porcentaje se invierte en el incremento de la temperatura del sólido seco (coadyuvante de mezcla), puesto que existe una menor cantidad de éste último.

Mezcla rica orujo seco: El orujo húmedo presenta unas características fluidodinámicas, distribución de tamaños, diámetro de partícula, etc., más adecuadas para el secado, debido a que el sólido al tener una humedad menor se encuentra más particularizado. Esto motiva que el contacto sea de mejor calidad que en el caso anterior puesto que la superficie expuesta al aire caliente es mayor. Pero por otro lado, como el sólido húmedo está compuesto fundamentalmente por orujo seco, una parte significativa de la energía aportada al secadero es utilizada para incrementar la temperatura de este sólido.

Con el fin de determinar las proporciones de orujo fresco y seco óptimos utilizados en la mezcla para la operación de secado, se deben seleccionar parámetros que cuantifiquen la particularización y la facilidad que presenta la mezcla para la fluidización. Se han seleccionado el ángulo de fractura y la distribución de tamaños del sólido húmedo y parcialmente seco.

- **Ángulo de fractura**, se define como el ángulo que forma la superficie inclinada del sólido con la horizontal, a partir del cual el sólido deja de deslizar sobre dicha superficie. Ángulos de fractura próximos a 90° representan sólidos de difícil tratamiento y manejo.

La medida del ángulo de fractura se realiza rellenando con el sólido a analizar un recipiente, semejante al representado en la Figura 3.7 (1), que tiene uno de los lados abatibles. Cuando está lleno, y sobre una superficie horizontal, se abre la tapa lateral abatible y se deja caer el sólido libremente, Figura 3.7 (2), hasta que se forma el ángulo de fractura mostrado en la Figura 3.7 (3).

- **Distribución de tamaños**, es un índice característico de propiedades fluidodinámicas y de superficie de contacto. El diámetro de partícula y la distribución de tamaños que presenta el sólido a la salida del secadero es prácticamente igual que los del sólido que se encuentra dentro del lecho fluidizado. Las distribuciones de tamaño con un alto contenido en partículas de pequeño diámetro presentan una superficie de contacto elevada.

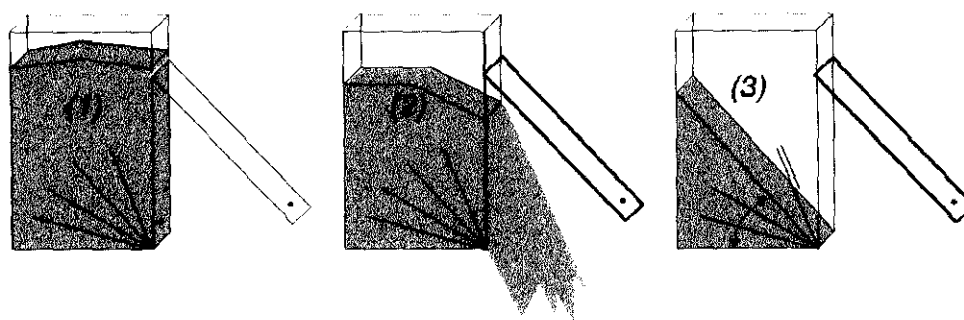


Figura 3.7.- Medida experimental del ángulo de fractura

Para la optimización del porcentaje de mezcla se han realizado experimentos en los que se deja secar, a temperatura ambiente, una mezcla de orujo seco y húmedo. El sólido se dispone en bandejas cuadradas de las siguientes dimensiones: 0.31 m de ancho, 0.41 m de largo y 0.08 m de altura. El experimento se prolonga hasta que la humedad de la mezcla prácticamente no varía con el tiempo. A lo largo del experimento y periódicamente se mide el ángulo de fractura, el contenido en humedad y la distribución de tamaños de la mezcla. Se han realizado cuatro experimentos en los que se ha variado el porcentaje de mezcla entre el 60 y el 90%.

En la Figura 3.8. se muestra la variación del ángulo de fractura con el tiempo de secado en función del porcentaje de mezcla. A partir de las 200 h. de haber realizado la mezcla, el ángulo de fractura es igual a 45° y se mantiene constante con el tiempo, la humedad del sólido en este intervalo corresponde a la humedad de equilibrio en las condiciones ambientales ($22-25^\circ\text{C}$).

Los porcentajes de mezcla por encima del 80% generan ángulos de fractura del sólido de 90° durante las primeras 25 a 50 horas. Dichos ángulos imposibilitan el tratamiento adecuado de dicho producto y empeoran las características fluidodinámicas del producto a tratar afectando, de esta forma, el adecuado contacto sólido-gas. Porcentajes de mezcla entre 60 y 70% producen también ángulos de fractura iniciales de 90° , pero dicho ángulo disminuye rápidamente en los primeros minutos posteriores a la realización de la mezcla, como se muestra en la Figura 3.8, bajando a valores comprendidos entre 65° y 70° en las primeras 20 a 25 horas. Las pendientes iniciales de la variación del ángulo de fractura con el tiempo de secado son semejantes para todos los porcentajes de mezcla, si bien son algo mayores para los porcentajes de mezcla del 80 y 90%.



Por ello, desde el punto de vista técnico y de tratamiento práctico del sólido, el porcentaje de mezcla debería estar limitado al 80%.

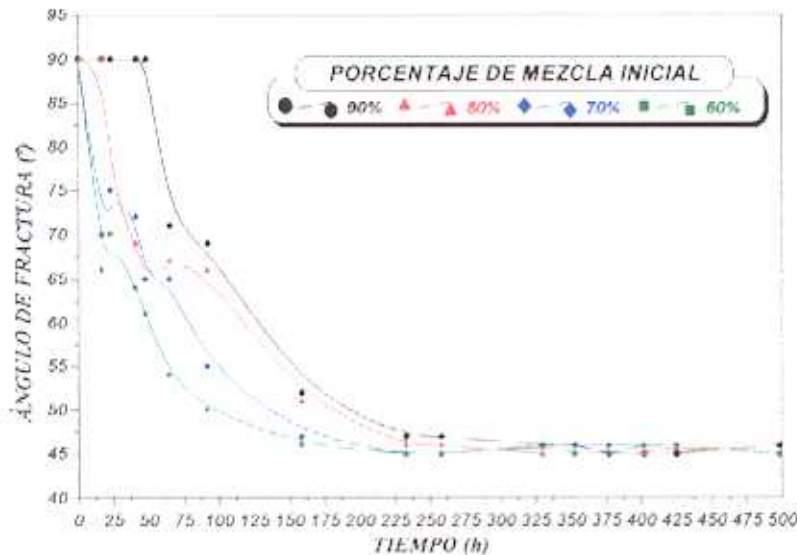


Figura 3.8.- Variación del ángulo de fractura con el tiempo de orujo fresco con distintos porcentajes de mezcla.

Desde un punto de vista técnico y de tratamiento, porcentajes de mezcla inferiores a 80% son adecuados para un aceptable contacto sólido-gas, puesto que con dichos porcentajes de mezcla, el orujo a tratar presenta un grado de particularización adecuado para ser tratado dentro de un lecho fluidizado. Por otro lado, para optimar el rendimiento térmico, se debe establecer un límite inferior próximo, de manera que el orujo a secar tenga el mayor contenido en orujo fresco posible. Así se propone como porcentaje de mezcla óptimo un valor comprendido entre el 80 y 70%.

Independientemente del porcentaje de mezcla inicial utilizado en cada uno de los experimentos, para tiempos largos de secado el ángulo de fractura tiende a 45°. Por otra parte, para tiempos largos de secado, la humedad de la mezcla permanece constante, hecho que indica que la humedad de la mezcla ha alcanzado o es muy próxima a su valor de equilibrio. Ambos hechos indican que, evidentemente, el ángulo de fractura depende de la humedad de la muestra. En la Figura 3.9, se muestra la variación del ángulo de fractura con la humedad del orujo para distintos



porcentajes de mezcla comprendidos entre el 60 y 90%. De nuevo se observa que, cuando la humedad del orujo húmedo se acerca al valor de la humedad de equilibrio, el ángulo de fractura, para todas los porcentajes de mezcla, tiende aproximadamente al mismo valor de 45°

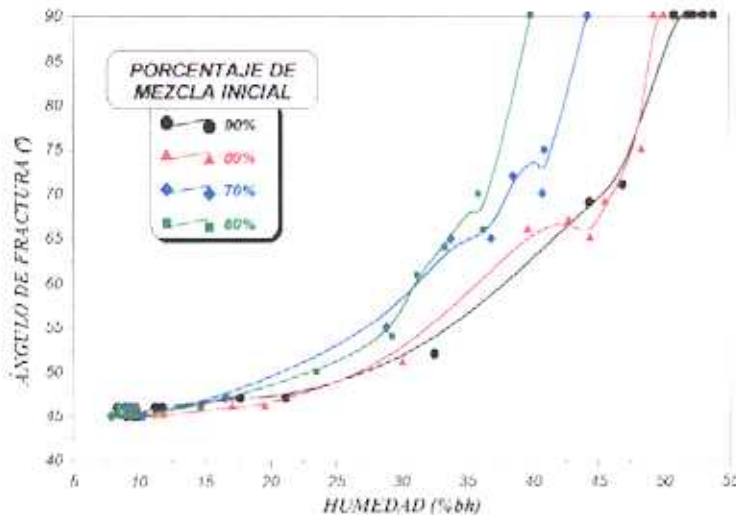


Figura 3.9.- Variación del ángulo de fractura con la humedad.

La humedad del orujo fresco depende de su procedencia e historia, por lo que el parámetro de proporción de mezcla expresado en función del porcentaje de orujo fresco adicionado a la mezcla puede no ser suficiente para describir al orujo húmedo. En la Figura 3.10 se muestra la humedad de orujo húmedo frente a la variación del porcentaje de mezcla. Cada serie de puntos dispuestos verticalmente corresponde a humedades del orujo fresco comprendidas entre 60 y 70%, en incrementos del 1%. Por ejemplo, para un porcentaje de mezcla del 76 % la humedad de la mezcla varía entre el 48 (humedad del orujo fresco 60%) y el 55.6% (humedad del orujo fresco 70%). En todos los casos, la humedad del orujo seco empleado en la mezcla era del 10%.

Con ayuda de la Figura 3.9 y la 3.10 se puede establecer una relación entre el valor de las humedades del orujo húmedo y fresco con el ángulo de fractura del mismo. Por otra parte, la humedad resultante de la mezcla de orujo fresco y seco, H_{mezcla} , se puede calcular fácilmente por:



$$H_{mezcla} = P_{mezcla} \cdot H_{fresco} + (100 - P_{mezcla}) \cdot H_{seco} \quad (3.3)$$

donde P_{mezcla} es el porcentaje de mezcla; H_{fresco} es la humedad del orujo fresco; H_{mezcla} es la humedad de la mezcla u orujo húmedo y H_{seco} es la humedad del orujo seco utilizado en la mezcla.

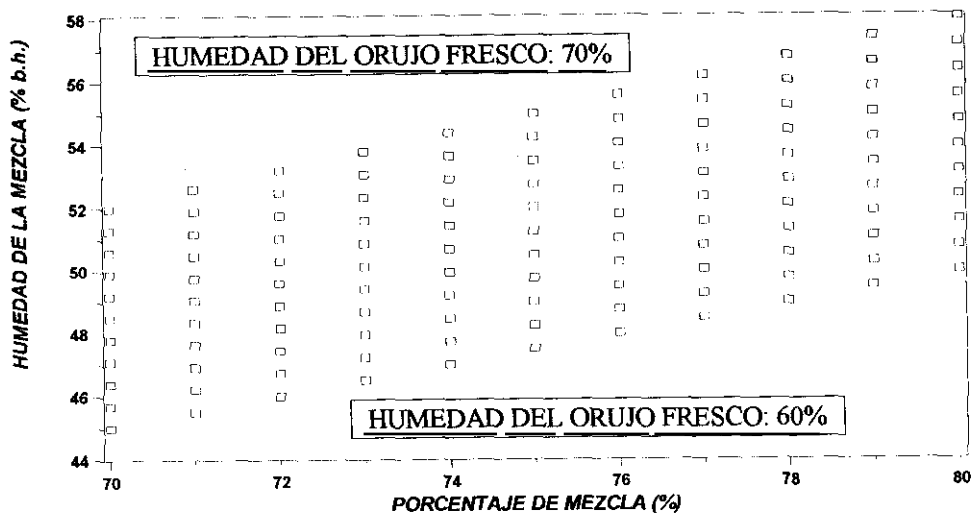


Figura 3.10.- Humedad del orujo húmedo frente al porcentaje de mezcla

De todo esto se desprende que efectivamente el porcentaje de mezcla no es el parámetro adecuado, por sí solo, para caracterizar al orujo húmedo, sino que se debe utilizar además la humedad real del sólido húmedo.

Se ha estudiado también el efecto del porcentaje de mezcla en el tamaño de partícula del orujo húmedo obtenido al mezclar orujo fresco y seco, una vez secado en lecho fluidizado/móvil. En la Figura 3.11 (a) y (b) se muestra la distribución de tamaños del orujo secado, en función del porcentaje de mezcla. Con (●) en la Figura 3.11(a) se muestran los resultados obtenidos para el orujo seco empleado en la mezcla. Como se observa en dicha figura, porcentajes de mezcla elevados (entre 90 y 80%) originan una distribución de tamaños donde existe una mayor cantidad de sólido con un diámetro de partícula superior a 2 mm. Según va disminuyendo el porcentaje de mezcla del orujo a tratar, disminuye de igual forma el peso de fracción con diámetros de partícula superior a 2 mm, aumentando, en relación directa, la fracción de sólido de diámetro inferior a éste. La falta de manejabilidad de mezclas con elevada humedad ha obligado a realizar el análisis de



tamizado del orujo húmedo parcialmente seco con una humedad del 25%, ya que para esta humedad dicho orujo es manejable en el tamizado en seco.

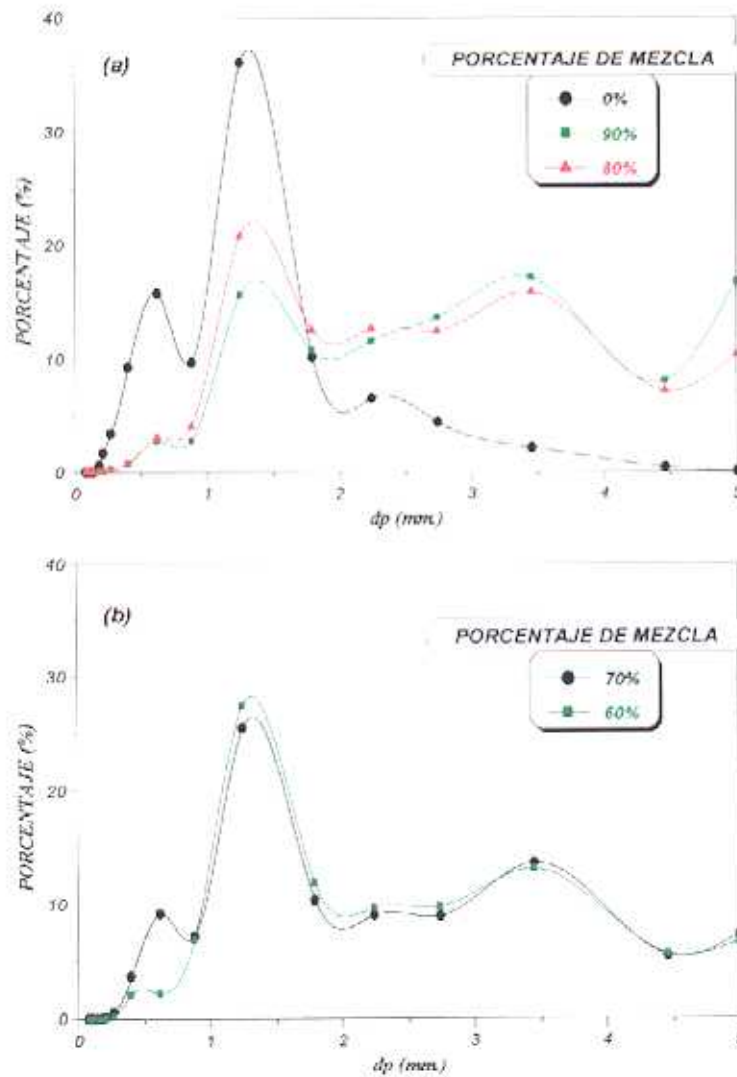


Figura 3.11.- Distribución de tamaño de partícula del orujo húmedo después de ser secado en función del porcentaje de mezcla: (a) (●) 0%; (■) 90%; (▲) 80%; (b) (●) 70%; (■) 60%

Para un buen comportamiento fluidodinámico en lecho fluidizado, interesan sólidos que presenten una distribución de tamaños en los que los dos máximos que se muestran en las Figura 3.11 (a) y (b) sean semejantes, es decir, con una cantidad elevada de sólido de diámetro menor de 1.5 mm. En general, estas condiciones motivan una mayor calidad de contacto sólido-gas y un menor gasto energético en cuanto a lo que se refiere a alcanzar las condiciones de fluidización de



producto a tratar. Por otra parte, porcentajes de mezcla por debajo del 80% favorecen estos aspectos.

El porcentaje de mezcla establecido como óptimo en base al ángulo de fractura se ve respaldado por la distribución de partículas del orujo seco. Por todo ello, el intervalo de valores del porcentaje de mezcla óptimo estará comprendido entre el 80 y 70%, en función de la humedad que presente el orujo fresco constituyente de la mezcla para obtener un orujo húmedo de aproximadamente el 50-52% de humedad.

3.4.- SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE SÓLIDO

El orujo húmedo se alimenta al lecho móvil, circula por él en sentido descendente y finalmente se suministra parcialmente seco, al lecho fluidizado. El diseño del sistema de alimentación de orujo húmedo depende mucho de las características físicas del alimento (humedad, viscosidad, etc.), y de algunas propiedades químicas (principalmente el contenido en azúcares).

El orujo fresco es un fluido no newtoniano, de porosidad libre nula (todos sus poros están llenos de agua), de viscosidad y humedad elevada. Estas propiedades tienen alta dependencia con múltiples factores, principalmente tiempo y condiciones de almacenamiento y proceso mediante el cual ha sido generado. El contacto orujo/aire dentro del secadero es muy defectuoso, por ello es necesario un sistema de alimentación que proporcione una alimentación particularizada.

Se diseñaron, en un principio, diversos sistemas de alimentación del orujo fresco. El sistema de alimentación que se muestra en la Figura 3.12 consiste en un sistema secuencial de carga-disparo mediante aire a presión. El procedimiento operativo es como sigue: Se carga con orujo fresco la cámara de alimentación y se presuriza ésta a 4 kg/cm² con aire, posteriormente se abre la vía de alimentación al secadero. De esta forma mediante esta presurización y descarga súbita el sólido a alimentar se particulariza mejorando, con ello, el contacto sólido gas dentro del secadero.

Se han realizado experimentos en los que se variaba el punto del secadero en el que se introduce la descarga de la alimentación. Las distintas alturas del secadero estudiadas son:

Alimentación al lecho fluidizado: Se realiza la descarga del sólido a 3 cm de la placa distribuidora mediante un tubo vertical. Con ello, se modifica la fluidodinámica del lecho



por la presencia de un objeto fijo y por las sobrepresiones que se desarrollan dentro del lecho en cada disparo de descarga. Los ensayos con este sistema de alimentación se han realizado manteniendo la zona del lecho móvil sin sólido.

Alimentación al lecho móvil: Se realiza la descarga en la superficie del lecho móvil, a 20 cm de la base del lecho móvil o zona tronco-cónica.

Ninguno de los sistemas de alimentación citados fue adecuado para la alimentación de orujo fresco. Entre los inconvenientes cabría destacar:

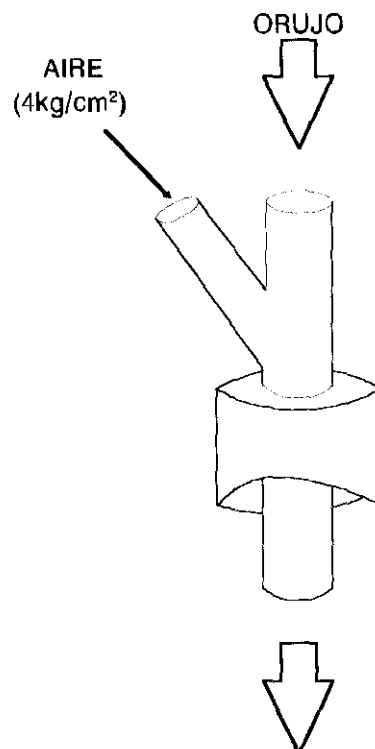


Figura. 3.12.- Sistema de alimentación del orujo fresco

- Creación de zonas de lecho fijo dentro del recipiente correspondiente al lecho fluidizado. Este efecto está motivado por un defectuoso contacto sólido-gas y por el elevado valor de humedad (65 %) con la que se alimenta el orujo al secadero.



- Caudal no constante de orujo fresco al secadero por cada disparo, debido a que dicho caudal es dependiente del sólido que contiene la cámara de alimentación, previamente a cada disparo, y que éste varía en función de las heterogeneidades físicas del propio producto.
- El sólido alimentado al lecho móvil, debido a su elevada humedad, presenta un grado de compactación elevado, generando una notable heterogeneidad dentro del lecho al que es alimentado. De esta forma, además de las heterogeneidades generadas ya mencionadas, dificulta mucho el transporte del sólido a través del secadero.

Los sistemas de alimentación de orujo húmedo al secadero que se han empleado definitivamente en la presente investigación, se pueden clasificar en dos grupos, en función del lecho al que se alimenta:

- **Alimentación al lecho móvil:** El sólido es alimentado desde un recipiente cilíndrico a la parte superior del lecho móvil por medio de la gravedad, como se ha descrito en el apartado 2.3.2. Como el orujo húmedo fluye fácilmente por gravedad no es necesaria la inyección de aire.
- **Alimentación al lecho fluidizado:** La alimentación al lecho fluidizado se realiza desde el lecho móvil. Durante la operación de secado se establece un equilibrio de fuerzas, entre la fuerza del peso del sólido presecado contenido en el lecho móvil y la fuerza del aire ascendente, como se muestra en la Figura 3.13. Este equilibrio fomenta la generación de una zona, dentro de la parte tronco-cónica del lecho móvil, donde la porosidad es menor que la del lecho fluidizado (prácticamente la del lecho retacado). Este efecto colapsa la alimentación, puesto que en esta zona y debido al equilibrio de fuerzas, se forma una bóveda de sólido que impide que el sólido presecado descienda y alimente al lecho fluidizado. Por ello, para la alimentación correcta del sólido del lecho móvil al fluidizado es necesario que se aumente la porosidad, para ello se han empleado disparos de aire a presión (4 kg/cm^2) dirigidos a dicha zona. Los disparos se realizan utilizando tres orificios realizados al efecto en la zona tronco-cónica, como se muestra en la Figura 3.13, los disparos se realizan en sentido ascendente (primero en la entrada 1 y en último lugar en la 3). El aire a presión se inyecta durante 0.5 s. y en intervalos de 1 s. De esta forma, se aumenta la porosidad en el sentido ascendente sin modificar apreciablemente la



fluidodinámica del lecho fluidizado. Como se tratará en apartados posteriores, esta alimentación se realiza únicamente cuando se dan las condiciones adecuadas de temperatura y de humedad del orujo que hay en el lecho fluidizado. Este sistema de alimentación permite alimentar al lecho fluidizado un caudal de 1 a 3 kg/h de orujo presecado, caudal adecuado para la operación de secado que se está tratando a la escala estudiada.

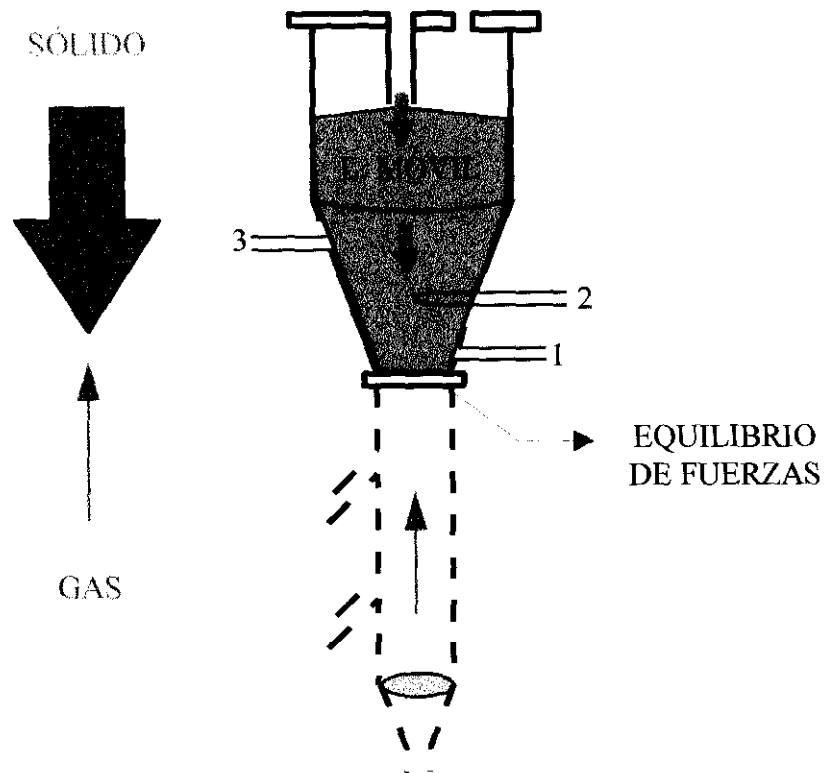


Figura 3.13.- Disposición de los pulsos de aire a presión y el equilibrio de fuerzas

4.- ESTUDIO DEL SECADO DE ORUJO



4.- ESTUDIO DEL SECADO DE ORUJO

En este apartado se tratarán distintos aspectos relacionados con el secado del orujo, entre ellos cabe destacar:

- Determinación de las humedades de equilibrio y crítica, esta determinación es fundamental, puesto que la humedad de equilibrio establece la mínima humedad que se puede obtener en el secado.
- Estudio de la influencia de la temperatura del lecho a la que se desarrolla la operación de secado, para diferentes tipos de contacto sólido-gas.
- Estudio de la influencia del caudal de aire empleado en el secado del orujo.
- Modelización del proceso de secado, estudiando primeramente la cinética de secado para posteriormente realizar dicha modelización utilizando redes neuronales artificiales.

4.1.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO

La humedad de equilibrio es un dato fundamental dentro de cualquier proceso de secado ya que marca el límite de humedad del sólido que se puede conseguir en el proceso para unas determinadas condiciones de operación.

La humedad de equilibrio del orujo, se ha determinado por el método propuesto por Evans and Critchfield y modificado posteriormente por Houston (Escardino et al, 1963). El método de operación utilizado es clasificado como un método estático.

La muestra de sólido es introducida en una cesta de metal (tela de cobre), la cesta se suspende de un alambre en un recipiente cerrado, como se muestra en la Figura 4.1. Periódicamente se van realizando pesadas de esta muestra sin sacarla del recipiente. Dicho recipiente permanece herméticamente cerrado entre dos pesadas consecutivas. De este modo es posible evaluar la pérdida de agua del sólido a analizar para la humedad relativa dentro del recipiente, sin que ésta se vea alterada por el medio exterior. En el fondo del recipiente, se dispone una disolución saturada de una sal (en ellas existe siempre un exceso de sal no disuelta para asegurar la saturación de la misma). El aire contenido en la parte superior del recipiente presenta, de este modo, una humedad relativa, perfectamente conocida. Se realizan nueve experimentos en los que se varía la sal de la disolución dispuesta en el fondo del recipiente. De este modo se varía la humedad relativa del aire que rodea a la muestra de orujo. En cada caso las sales utilizadas fueron



seleccionadas bibliográficamente (Escardino et al, 1963, Stokes et al, 1949 y Wink 1946). Dichas disoluciones son mostradas, junto con la humedad relativa del aire en equilibrio con ellas, en la tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Humedad relativa del aire en equilibrio con disoluciones saturadas de algunas sales utilizadas a 25 °C

<i>SAL</i>	<i>HUMEDAD RELATIVA (%)</i>
<i>Cloruro de Litio</i>	<i>11.1</i>
<i>Acetato potásico</i>	<i>22.5</i>
<i>Cloruro de magnésico</i>	<i>32.5</i>
<i>Carbonato potásico</i>	<i>43.7</i>
<i>Dicromato sódico</i>	<i>53.3</i>
<i>Nitrito sódico</i>	<i>64.4</i>
<i>Cloruro sódico</i>	<i>75.4</i>
<i>Cloruro potásico</i>	<i>84.3</i>
<i>Fosfato monoamónico</i>	<i>92.5</i>
<i>Agua destilada</i>	<i>100</i>

Las muestras antes de ser introducidas en el recipiente son pesadas (peso inicial). La muestra se mantiene, a una temperatura constante de 25 °C, dentro de los recipientes y se pesan periódicamente hasta alcanzar peso constante (peso final), en este momento se alcanza la humedad de equilibrio del sólido que constituye la muestra. La determinación de la humedad final del sólido se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$humedad = \frac{(Peso\ inicial - Peso\ final) \cdot 100}{Peso\ inicial} \quad (4.1)$$

En la Figura 4.2 se muestra la variación de la humedad de equilibrio del orujo con la humedad relativa del aire. La humedad relativa marca la humedad final del sólido a secar. El intervalo de humedades relativas del aire en el ambiente de trabajo esta comprendido entre el 30-45%. En este intervalo, la humedad de equilibrio del sólido esta comprendida entre el 4 y 8%.

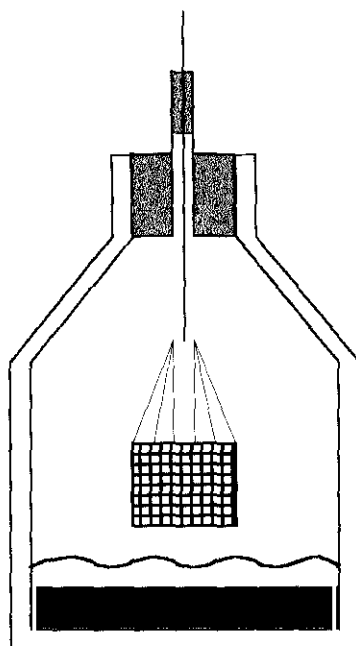


Figura 4.1.- Sistema utilizado para la determinación de las humedades de equilibrio.

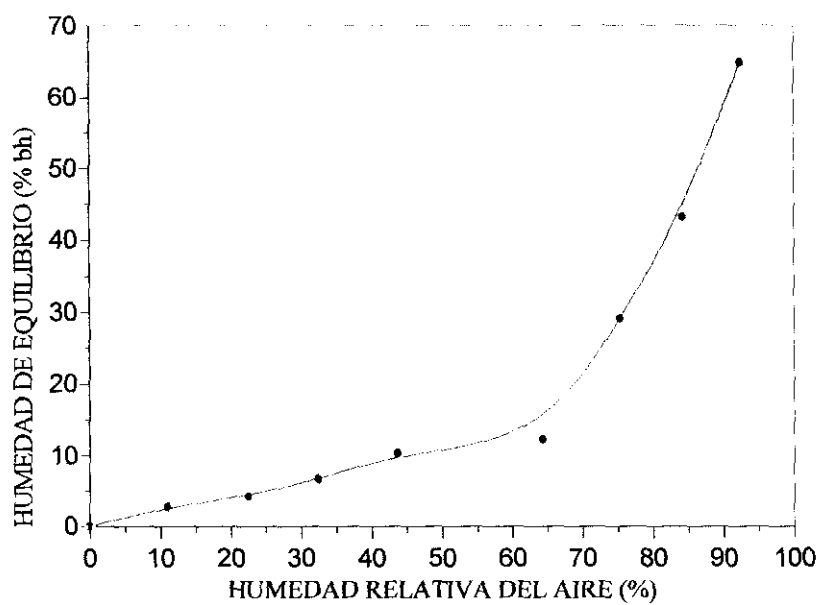


Figura 4.2.- Variación de la humedad de equilibrio del orujo (25°C, 1Atm).



4.2.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD CRÍTICA

Como se ha comentado en la introducción, la humedad crítica es el límite entre el periodo de velocidad constante y decreciente, es decir, cuando el perfil de la curva de secado pierde su linealidad. Dicha humedad es una variable que depende de múltiples factores, tales como: tipo, espesor y disposición del sólido en el lecho, la humedad inicial, etc. Por todo ello, se han realizado tres medidas que se diferencian en la forma y dimensión del lecho y en la temperatura del aire.

En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestran sendas curvas de secado correspondientes al secado en lecho fijo de orujo fresco cuya humedad inicial era de 68.41%. El secado se llevó a cabo a temperatura ambiente. Dichos lechos están clasificados por tamaños como tipo A (fondo de cápsula de vidrio ocupado por orujo en un casquete esférico de 0.06 m de diámetro y $1 \cdot 10^{-3}$ m de altura) y tipo B (cápsula Petri ocupada por orujo en un cilindro de dimensiones 0.012 m de altura y 0.104 m de diámetro).

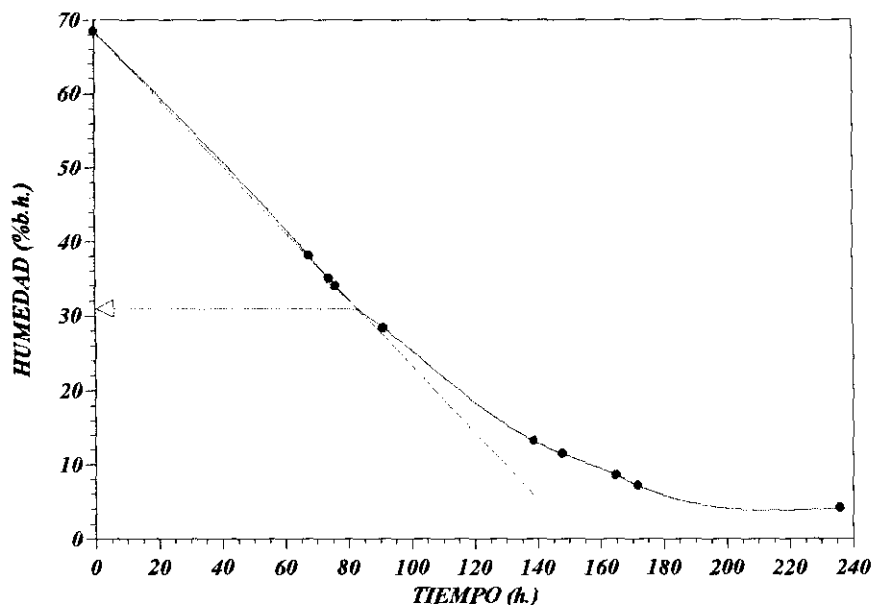


Figura 4.3.- Curva de secado en cápsula esférica, (dimensiones tipo A, temperatura ambiente).



En la Figura 4.5 se muestra una curva de secado de orujo fresco de humedad inicial del 68% en un lecho fijo de las mismas dimensiones que el lecho tipo B pero formado en una cestilla de malla de acero inoxidable suspendida en una corriente de aire a 60-65°C.

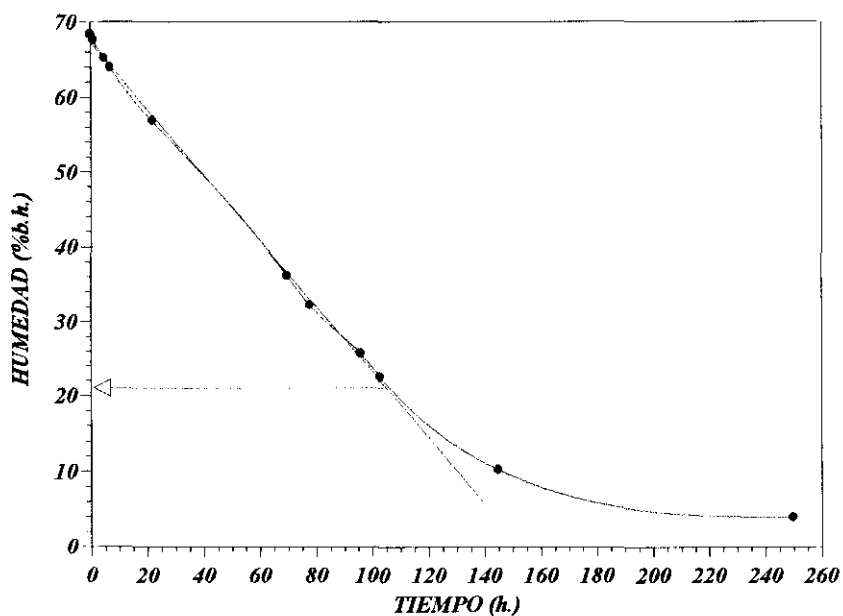


Figura 4.4.- Curva de secado en cápsula Petri, (dimensiones tipo B, temperatura ambiente).

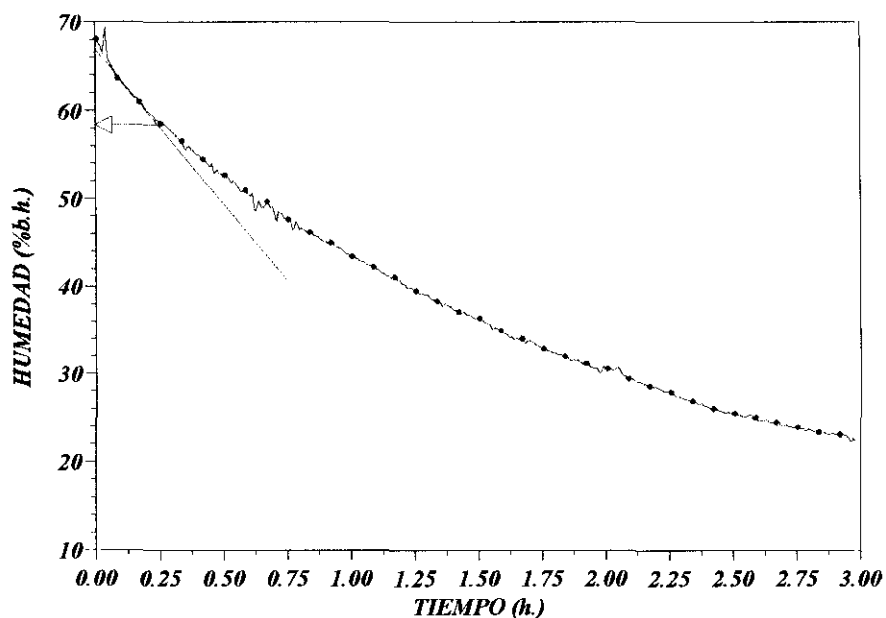


Figura 4.5.- Curva de secado en cestilla, (dimensiones tipo B, temperatura 60-65°C).



De acuerdo con los resultados de estos experimentos, las humedades críticas y la velocidad del período de velocidad de secado constante dependen de la temperatura de operación, humedad inicial del orujo y geometría del lecho. De forma que se obtienen humedades críticas del 58-60% (cestilla tipo B con convección forzada a 60-65°C) y del 20-30% (convección natural en cápsulas de geometría tipo A y B).



4.3.- INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN Y TIPO DE CONTACTO

En cualquier operación de secado la temperatura es un factor transcendental. Para una adecuada velocidad de secado, es deseable que la temperatura sea lo más elevada posible, puesto que cuanto mayor sea la temperatura del aire mayor es la cantidad de energía que se le comunica al sólido para extraer el líquido y el tiempo que se invierte en esta operación es menor, aumentando así la producción de sólido seco. Por otro lado y teniendo en cuenta que el producto a secar, en este caso, es un subproducto procedente de la elaboración del aceite de oliva y que tiene utilidad dentro del mundo agroalimentario, la temperatura del proceso debe de ser limitada para evitar degradar los productos generados a partir de dicho sólido, tales como el aceite de orujo, piensos para animales, compost, etc. Debido a estos factores, la temperatura óptima de secado del orujo debe ser determinada en función a los siguientes objetivos:

- Aumentar la producción de sólido seco del secadero mediante un aporte energético elevado, este efecto se produce mediante un aumento de la temperatura de operación.
- Minimizar el rendimiento en las reacciones de caramelización, potenciadas por la presencia de azúcares en el orujo, y la degradación del aceite de orujo.
- Minimizar la formación de estructuras cerradas, es decir, aglomerados de partículas de gran diámetro que originan la disminución de la humedad únicamente en la superficie de la partícula, generándose dentro de ella un gradiente de humedad. Este efecto hace disminuir el rendimiento de la operación de secado y de la posterior extracción del aceite de orujo.

El aporte energético viene suministrado por el aire caliente, pero el aprovechamiento de dicho aporte depende de la eficacia de contacto que tiene lugar entre el sólido húmedo y el fluido caliente dentro del secadero. Cuanto más íntimo sea el contacto durante la operación de secado, mayor será el rendimiento energético. El lecho fluidizado, debido a las características ya comentadas en el apartado 1.3, tiene propiedades dinámicas que favorecen dicho contacto. Por ello, los secaderos basados en lechos fluidizados tienen habitualmente un rendimiento energético elevado.



Para la optimación de la temperatura dentro de la operación de secado y, dado que el secadero está compuesto por dos partes bien diferenciadas, se ha optimado la temperatura dentro del lecho fluidizado y se ha tenido en cuenta sus efectos en el comportamiento del lecho móvil.

4.3.1.- Secado en bandeja a temperatura ambiente

El estudio del secado en bandeja a temperatura ambiente se ha llevado a cabo con el fin de disponer de una referencia de las propiedades finales del orujo seco y realizar posteriormente un análisis comparativo de dichas propiedades con las obtenidas en condiciones reales de operación del secadero fluidizado/móvil.

En un primer experimento se han dispuesto 1.4 kg de orujo fresco con una humedad del 53% en una bandeja de 0.12 m³ mostrando una superficie externa al ambiente de 0.129 m². La altura de sólido en la bandeja es de 0.02 m. La bandeja no presenta perforaciones por lo que el aire no circula a través del sólido. Por ello, el intercambio es mediante convección natural que se lleva a cabo a través de la superficie externa superior de la capa sólida. Se han invertido 125 h., como se muestra en la Figura 4.6, para secar el sólido hasta las condiciones de equilibrio, la velocidad de secado constante es de 0.34 h⁻¹. El aceite extraído presentaba unas características analíticas medias de acidez del 14% y de contenido graso del 3%, que son adecuadas para una posterior etapa de refinado.

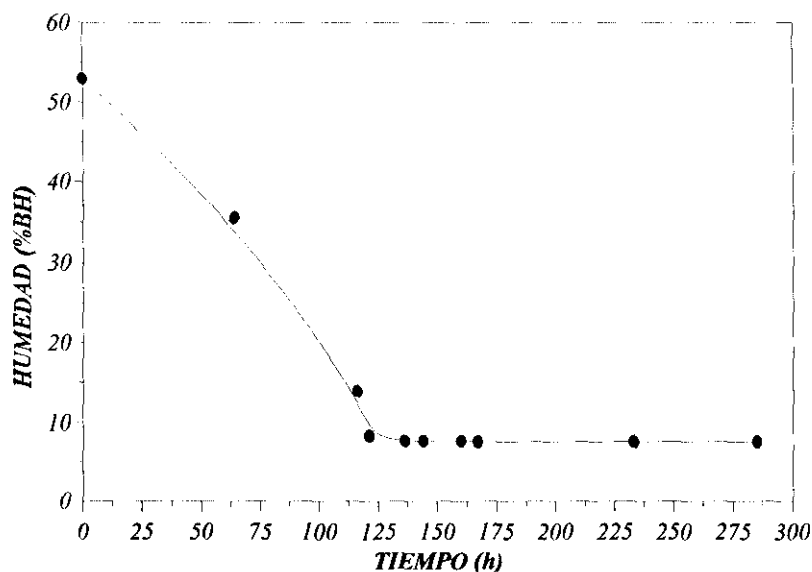


Figura 4.6.- Curva de secado de orujo fresco en bandeja (temperatura ambiente 20-23°C)



En la Figura 4.7. se muestra una curva de secado del orujo húmedo con un porcentaje de mezcla del 60%, y con una humedad inicial del 45%, en el mismo recipiente descrito anteriormente. La humedad de equilibrio fue alcanzada al cabo de 125 h.

En las dos curvas de secado, Figuras 4.6 y 4.7, se pueden apreciar dos zonas bien diferenciadas, una correspondiente al período de velocidad constante (pendiente negativa) y otra correspondiente al período de velocidad decreciente, zonas típicas de una curva de secado, como se ha mencionado en el apartado 1.2.1.

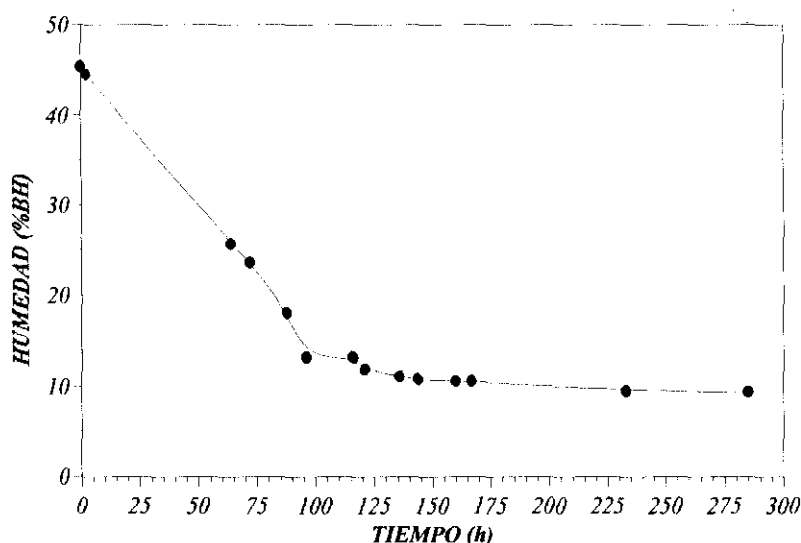


Figura. 4.7.- Curva de secado de orujo húmedo en bandeja (Porcentaje de mezcla 60%; temperatura ambiente 20-23°C)

Durante el secado del orujo fresco en bandejas aparece un gradiente de humedades con la profundidad de la capa. Por ejemplo, para el experimento de secado de orujo fresco, las humedades en la base del recipiente son del orden del 66% como humedad inicial, mientras que en la superficie la humedad ha disminuido al 53% en las primeras 40 h. En los dos experimentos la parte más superficial del orujo seco es una corteza dura con aspecto de sólido compacto no granular. La presencia de esta capa superficial dificulta la difusión del agua desde el interior al exterior del orujo e impide un contacto sólido-gas adecuado con la totalidad del orujo presente, y por ello la velocidad de secado del sólido es, de 0.34 h^{-1} , evidentemente muy baja.



En la Figura 4.8 se muestra la evolución de la humedad con el tiempo en un tercer experimento de secado en bandeja con volteo o mezcla intermedia. Se secó una muestra de 1.35 kg de orujo fresco con una humedad inicial del 67%, con una superficie expuesta al ambiente de 0.12 m² y un espesor de la capa de orujo fresco de 3 cm. En esta figura, se pueden observar dos zonas de comportamiento totalmente diferente:

La **primera zona**, representa el secado en bandejas de un lecho donde el contacto con el ambiente se lleva a cabo únicamente por la superficie superior. En el primer tramo de esta zona se observa el período de velocidad constante de pendiente negativa (velocidad de secado 1.25 h⁻¹) y posteriormente (a las 5 o 6 horas) se entra en el primer periodo de velocidad decreciente donde la pendiente disminuye en valor absoluto.

La **segunda zona**, después de voltear y mezclar todo el sólido de la bandeja muestra una mejora de contacto. Se entra de nuevo en un periodo de velocidad constante, de pendiente elevada, (velocidad de secado 1.25 h⁻¹) otro primer periodo de velocidad decreciente similar a la primera zona, a partir de las 50 horas y, por último, se llega a la humedad de equilibrio, que para las condiciones de operación es aproximadamente de un 9%.

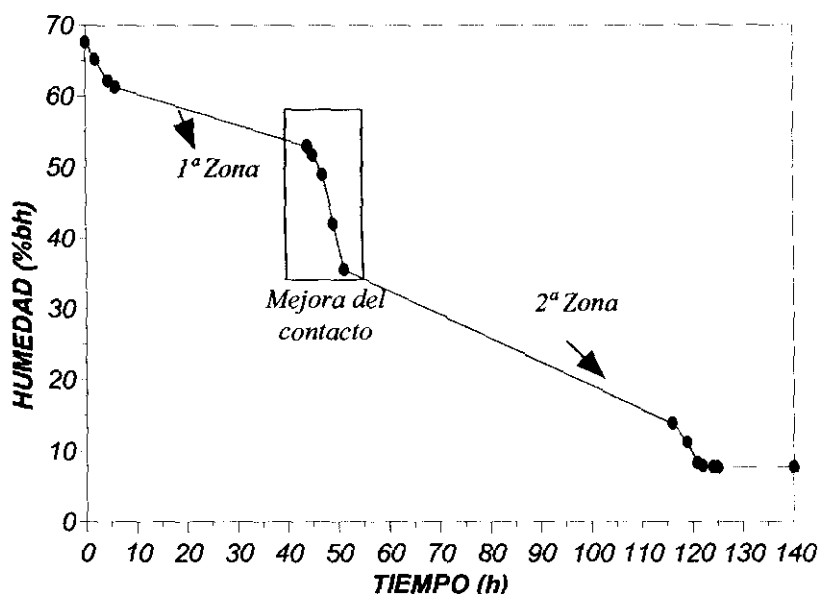


Figura 4.8- Curva de secado de orujo fresco en bandejas a temperatura ambiente con volteo intermedio (20-23°C)



Como se puede apreciar en la Figura 4.8, debido al proceso de rotura de gránulos y de mezcla del orujo parcialmente seco de la superficie con el orujo húmedo situado en la parte baja de la bandeja, se produce una disminución drástica de la humedad en las 45-50 h. (final de la primera zona e inicio de la segunda zona). Comparando la Figura 4.8 con las Figuras 4.6 y 4.7 se puede observar que el tiempo empleado para alcanzar las condiciones de equilibrio es casi igual (125-130 h) a pesar de que la humedad inicial del orujo fresco de la Figura 4.8 era más del 20% superior a la de los otros sólidos. Esto evidencia la mejora del contacto y del secado mediante un proceso de mezcla.

El contacto sólido-gas, como era de esperar, es fundamental a la hora de facilitar un proceso de difusión de materia dentro del sólido y uniformizar la humedad del orujo seco, adecuando de esta forma el orujo seco a procesos y tratamientos posteriores.

4.3.2.- Secado en lecho fijo

Se han determinado curvas de secado de orujo fresco en lecho fijo y se han calculado las velocidades de secado. Los experimentos se han realizado en una celda cilíndrica de 0.04 m. de diámetro y 0.05 m de altura, construida en tela metálica y suspendida en una corriente de aire caliente a 60-65°C. El lecho de orujo fresco presenta un volumen de $3.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ (0.03 m de altura y 0.04 m de diámetro), y una superficie externa de $4.24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ en un grupo de experimentos. En otro experimento, el lecho de orujo fresco presentaba un volumen de $1.9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ (0.015 m de altura y 0.04 m de diámetro), y una superficie externa de $3.14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

En la Figura 4.9 se muestra, a modo representativo, la curva de secado del experimento en que la altura de lecho es de 0.03 m, donde la humedad se representa en trazo grueso y la temperatura del aire en trazo fino. La curva de secado corresponde a un orujo fresco con una humedad inicial del 67%. La velocidad de secado en el período de velocidad constante, definida en el apartado 1.2.1.2.1, es de 10 h^{-1} , considerablemente mayor que la obtenida en los experimentos de secado en bandeja a temperatura ambiente en las que las velocidades de secado estaban comprendidas entre 0.34 y 1.25 h^{-1} (comparando las Figuras 4.9 con las 4.6 y 4.7) a pesar de que la superficie de contacto en este caso $4.24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, es inferior a la de los experimentos en bandeja, 0.129 m^2 . Esto está evidentemente motivado por la temperatura de operación de secado más elevada (60-65°C), y la circulación forzada del aire a través del lecho.

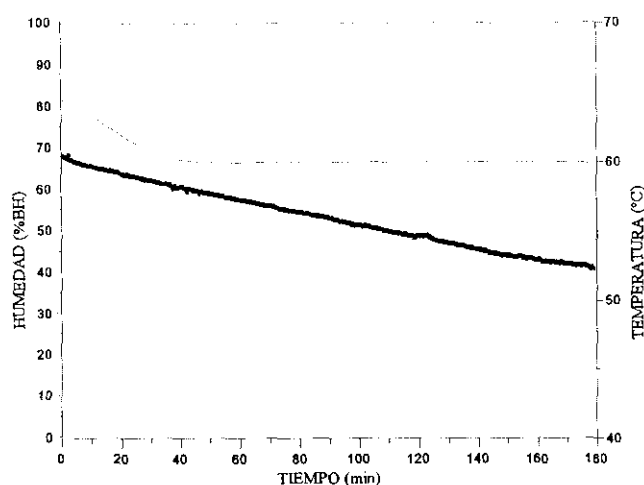


Figura 4.9.- Curva de secado de orujo fresco en lecho fijo

4.3.3.- Secado en lecho fluidizado

Se han realizado varias series de experimentos de secado en modos continuo y semicontinuo utilizando únicamente la parte de lecho fluidizado del secadero fluidizado/móvil. El objetivo de todo ello era optimar la temperatura de operación dentro del lecho fluidizado y comprobar si se produce un adecuado contacto en dicho lecho. Se han ensayado distintas temperaturas del lecho en el intervalo entre 75 y 125 °C y caudales de aire de entre 4 y 5 L/s. El orujo fresco, debido a su elevada humedad, presenta unas características fluidodinámicas que imposibilitan su fluidización. La fluidización de este tipo de sólidos promueve la formación de canales preferentes, rotura del lecho, etc. produciendo un contacto inadecuado para la operación de secado. Por ello, en estos experimentos se secó orujo húmedo con una humedad inicial comprendida entre 45 y 52%.

En la Figura 4.10 se puede observar una curva de secado en lecho fluidizado donde se muestran los perfiles de temperatura del aire de entrada y del lecho, además de la humedad del sólido a la salida del mismo. El proceso operativo es continuo y se han secado 2.4 kg de orujo húmedo. En el lecho fluidizado, debido a que el sólido particularizado está suspendido en el fluido ascendente, el contacto sólido-gas es de mejor calidad que el producido en un lecho fijo. Debido a esta diferencia de calidad de contacto se puede observar que la velocidad de secado aumenta apreciablemente presentando un valor comprendido entre 64 y 128 h⁻¹ en función de las condiciones de operación (75 y 125°C), el tiempo de secado para alcanzar las condiciones de equilibrio del sólido a tratar, es sólo de 10 o 12 minutos. De igual forma en la Figura 4.10 se puede observar la



inestabilidad que presenta la temperatura del lecho, debido al alimento en forma de pulsos de sólido húmedo al mismo (de unos 100-150 g cada uno), con el consiguiente acercamiento momentáneo de la temperatura del lecho a la temperatura de bulbo húmedo y posterior recuperación. Teniendo en cuenta que una de las aplicaciones más extendida actualmente del orujo es la extracción con hexano del aceite de orujo a partir de dicho sólido seco, es necesario obtener, para dicha extracción, un sólido con una humedad por debajo del 10-12%. En la figura se ha señalado con una línea roja el límite de extractabilidad en cuanto a esta humedad máxima.

En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se muestran curvas más detalladas de secado de orujo húmedo en lecho fluidizado con caudales de aire de 4, 4.6 y 5 L/s. respectivamente y en modo semicontínuo (una sola carga inicial de sólido húmedo).

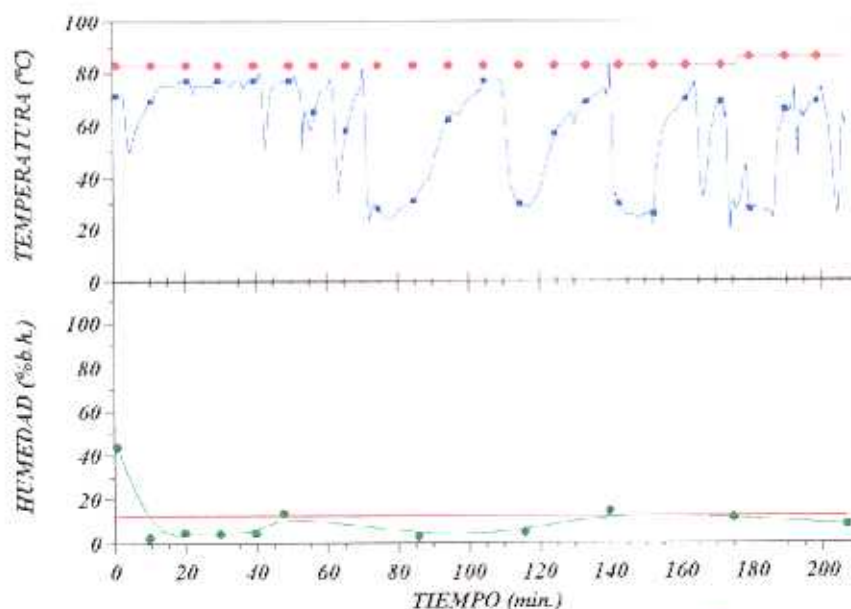


Figura 4.10.- Secado de orujo húmedo en lecho fluidizado, 4.1 L/s; (●) Temperatura del aire de entrada; (■) Temperatura del lecho; (●) Humedad del sólido seco; (—) Límite de extractabilidad.

En la tabla 4.2 se muestra un resumen de los resultados de estas Figuras reflejando en ella los tiempos empleados para alcanzar este límite de extractabilidad en función de la temperatura del aire de entrada y del lecho y del caudal de aire empleado.

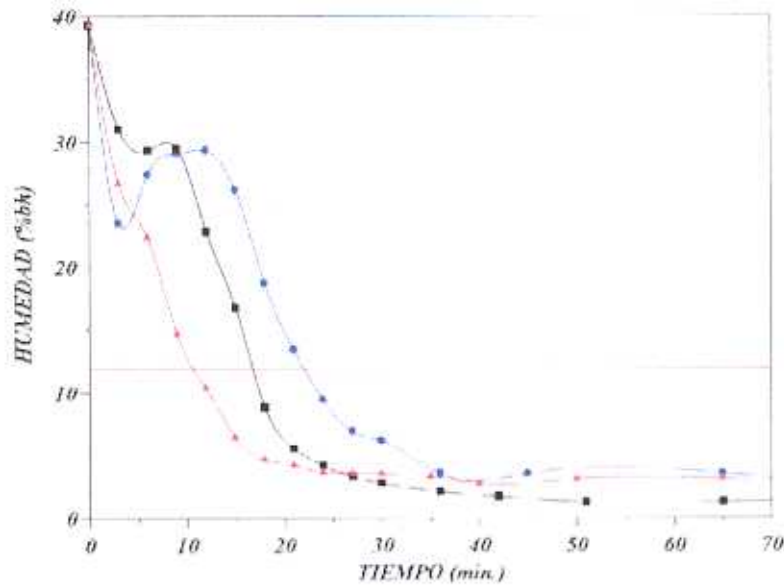


Figura. 4.11. Curva de secado de orujo húmedo en lecho fluidizado.

(●) 75°C, 4.08 L/s, 0.89 m/s; (■) 100°C, 4.1 L/s, 0.9 m/s; (▲) 125°C, 4.1 L/s, 0.9 m/s;
(—) Límite de extractabilidad.

Tabla 4.2.- Relación de tiempos en función de la temperatura del lecho y caudal de aire utilizado

Temperatura media del aire de entrada (°C)	87	112	135
Temperatura media del lecho(°C)	75	100	125
CAUDAL DE AIRE (L/s)	Tiempos (min)		
4	23	17	12
4.6	24	17	13
5	22	16	12

Como se puede observar en la tabla 4.2 y en las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 el caudal de aire en el intervalo aquí estudiado no tiene gran influencia en la operación de secado, siempre que sea superior a 4 L/s (aproximadamente 1.5 veces la velocidad mínima de completa fluidización).

4.3.3.1.- Influencia de la temperatura

En la Figura 4.13 se muestran curvas de secado a tres temperaturas para un mismo caudal de aire aproximado de 5 L/s ($u_0 \approx 1.1$ m/s). El tiempo requerido para alcanzar las condiciones de



extractabilidad (humedad del sólido inferior al 12%) disminuye con la temperatura, de 22 min a 70°C a 12 min a 125°C.

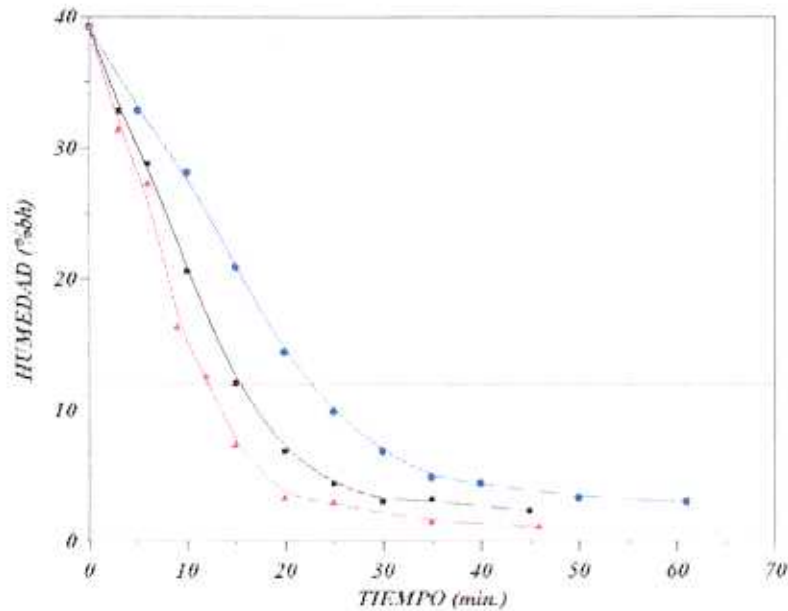


Figura 4.12.- Curva de secado de orujo húmedo en lecho fluidizado.
 (●) 75°C, 4.6 L/s, 1 m/s; (■) 100°C, 4.6 L/s, 1 m/s; (▲) 125°C, 4.7 L/s, 1 m/s;
 (—) Límite de extractabilidad.

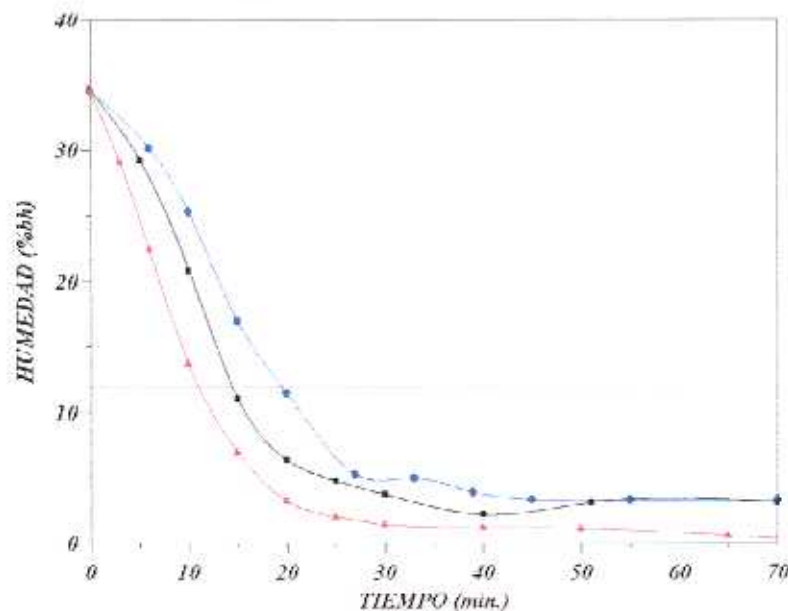


Figura 4.13.- Curva de secado de orujo húmedo en lecho fluidizado,
 (●) 75°C, 5 L/s; (■) 100°C, 5 L/s; (▲) 125°C, 5 L/s; (—) Límite de extractabilidad.



La temperatura de operación, es la variable que mayor influencia presenta en la velocidad de secado. Al aumentar la temperatura en 25° C el tiempo requerido para el secado hasta el límite de extractabilidad disminuye 5 minutos, independientemente del caudal de aire alimentado, tabla 4.2. La temperatura de operación dentro del lecho debe ser de 125°C ya que como se muestra en las figuras anteriormente mencionadas, es con la que se necesita un menor tiempo de permanencia dentro del lecho fluidizado, produciendo de esta forma una mayor capacidad de secado del sólido húmedo. Desde el punto de vista de las operaciones posteriores a la operación de secado, como se discute más adelante (tabla 4.6), las analíticas son adecuadas para una efectiva etapa de refinado del aceite extractado a partir del sólido producido.

4.3.3.2.- Influencia del caudal de aire de fluidización

Dentro de cualquier operación que se lleve a cabo en lecho fluidizado, donde el contacto entre sólido-gas representa una etapa fundamental dentro de la propia operación, el caudal de gas, en general, es un factor muy importante. En el secado de un sólido heterogéneo en lecho fluidizado el caudal de aire es importante por varias razones, entre las que cabe destacar:

- La energía es transportada por el aire en forma de calor sensible y, por ello, dicho caudal controla directamente el aporte energético necesario para el secado.
- El caudal de aire afecta a la calidad de la transferencia de materia y energía
- El aire es el vehículo que se utiliza durante la operación de secado para arrastrar el agua, una vez extraída del sólido húmedo. Esta capacidad de intercambio de materia, como se tratará posteriormente, está íntimamente relacionada con las características físicas del aire, especialmente humedad y temperatura.
- Dentro del contacto sólido-gas en lecho fluidizado, el aire juega un papel primordial en los fenómenos fluidodinámicos y hay que mantener una velocidad de fluidización adecuada.

En el caso que nos ocupa, y para el secadero experimental que se está tratando, el caudal de aire ha sido fijado mediante requerimientos totalmente fluidodinámicos, analizando posteriormente la capacidad de deshidratación del fluido y el aporte energético de éste al sólido húmedo a tratar.



De esta forma se establece un margen de operación acotado mediante varias situaciones:

- Al utilizar la velocidad de fluidización como parámetro de diseño, se óptima tanto el consumo de fluido como el coste de compresión del mismo.
- Al analizar la capacidad de deshidratación del aire desde el punto de vista de la humedad relativa, se evitan zonas donde, a consecuencia de ésta, pueda darse una hidratación del sólido a tratar debido a una elevada humedad relativa del aire.
- Se estudia la temperatura de salida del aire con el fin de analizar cuál es el grado de utilización energético.

La velocidad de fluidización se ha fijado haciendo que la velocidad de paso del fluido se encuentre entre la velocidad mínima de completa fluidización y la velocidad de arrastre del sólido. Con esta velocidad y en función del diámetro de lecho se puede calcular el caudal que se ha de utilizar. Debido a las limitaciones del compresor disponible, sólo podrán utilizarse caudales hasta 5 L/s, por lo que el intervalo de velocidades estudiado ha sido de 0.9-1.1 m/s (4-5 L/s). Cuando este caudal ha sido fijado, se analiza la capacidad de evaporación del aire que entra en el secadero, mediante el análisis del incremento en la humedad relativa de dicho aire, en su paso a través del secadero.

A pesar de que el caudal de aire, en principio, se seleccionó en función de aspectos fluidodinámicos, se han realizado experimentos para estudiar la influencia del caudal de aire en el tiempo de secado. En las siguientes figuras se muestran curvas de secado de orujo húmedo para diferentes caudales de aire a diversas temperaturas.

En la Figura 4.14 se muestra curvas de secado para temperaturas del lecho de 75°C. Es de destacar la escasa influencia que tiene el caudal de aire una vez que se han superado las condiciones de mínima fluidización. No obstante, para caudales de aire del orden de 4 L/s y menores y humedades del sólido relativamente elevadas se produce un contacto sólido-gas defectuoso, sobre todo en la primera etapa de secado donde la humedad del sólido es mayor.

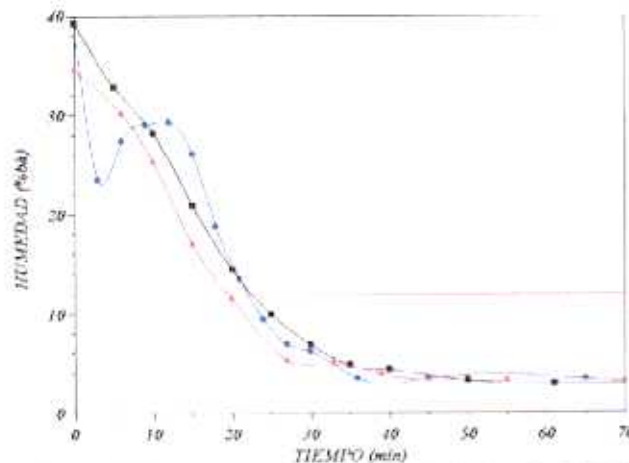


Figura 4.14.- Perfil de humedad con una temperatura de lecho de 75°C, (●) 4.1 L/s, 0.9m/s; (■) 4.6 L/s, 1 m/s; (▲) 5 L/s, 1.1 m/s; (—) Límite de extractabilidad.

Como se muestra en la Figura 4.15, las curvas de secado para temperaturas del lecho de 100°C tienen una menor influencia del caudal del aire, una vez superadas las condiciones de mínima fluidización.

En la Figura 4.16 se muestran curvas de secado de orujo húmedo para temperaturas del lecho de 125°C. Es de destacar, al igual que en las figuras anteriores, la poca influencia que tiene el caudal de aire una vez superadas las condiciones de mínima fluidización. Los tiempos de permanencia, como cabría esperar, se acortan, como se aprecia si se comparan estos resultados con los obtenidos para temperaturas de operación inferiores, mostrados en las Figuras 4.14 y 4.15.

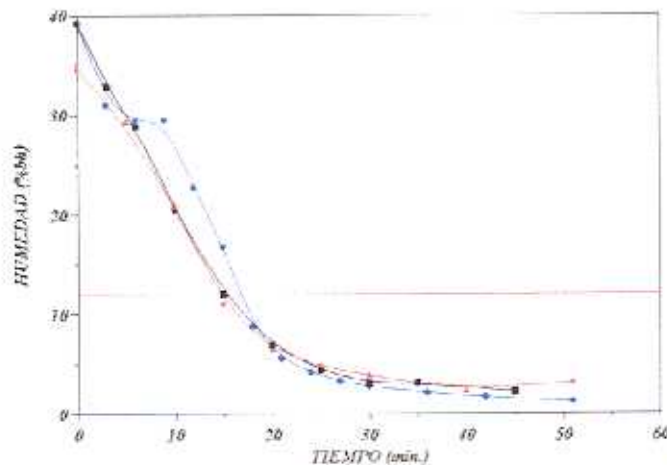


Figura 4.15.- Perfil de humedad con una temperatura de lecho de 100°C, (●) 4.1 L/s, 0.9 m/s; (■) 4.6 L/s, 1 m/s; (▲) 5 L/s, 1.1 m/s; (—) Límite de extractabilidad.

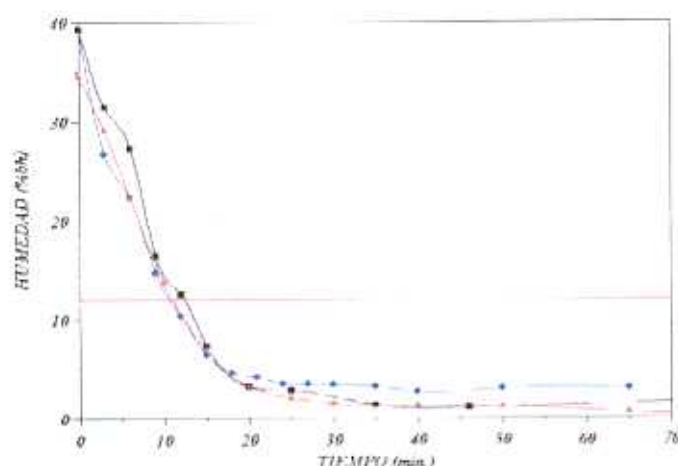


Figura 4.16.- Curva de secado de orujo húmedo en lecho fluidizado con una temperatura de lecho de 125°C. (●) 4.1 L/s, 0.9 m/s; (■) 4.7 L/s, 1 m/s; (▲) 5.1 L/s, 1.1 m/s; (—) Límite de extractabilidad.

Debido a la escasa influencia que tiene el caudal del medio fluidizante una vez superada la velocidad mínima de completa fluidización, se ha seleccionado como caudal de alimentación de aire al secadero el valor intermedio entre los estudiados, 4.7 L/s. Como se muestra en la Figura 4.14, 4.15 y 4.16, caudales de 4.1 L/s provocan inestabilidades del perfil de humedades en los primeros 10 a 15 min, provocado fundamentalmente por un contacto sólido-gas defectuoso entre el sólido inicial muy húmedo y el aire. Por contra, el caudal de 4.7 L/s, como se muestran en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16, proporcionan curvas de secado más homogéneas, deduciéndose que esta velocidad origina un contacto dentro del lecho adecuado para realizar la operación de secado y evitándose de esta forma gastos energéticos innecesarios, que disminuirían el rendimiento energético del proceso global.

4.3.4.- Secado en lecho móvil

Dada la disposición del lecho móvil en el secadero, en la zona superior del lecho fluidizado mostrada en la Figura 2.1, la temperatura dentro de dicho lecho móvil está condicionada, entre otras cosas, por la temperatura del aire que sale del lecho fluidizado; por ello se han realizado varias series de experimentos de secado de orujo húmedo con temperaturas de operación del lecho fluidizado entre 75 y 125 °C y con caudales de aire comprendidos entre 4 y 5 L/s. El porcentaje de mezcla del orujo húmedo a secar es del 65-70%. Se ha analizado el perfil de humedades dentro del lecho móvil, lo que es fundamental dentro de la operación de secado en el secadero



fluidizado/móvil puesto que la parte inferior del lecho móvil alimenta sólido presecado al lecho fluidizado. Un sólido con un mayor grado de presecado tiene una humedad menor a la entrada al lecho fluidizado y por lo tanto el tiempo de residencia dentro del lecho fluidizado necesario para conseguir el grado de secado final deseado es menor, aumentando de esta forma la cantidad de sólido fresco que puede tratarse.

En la Figura 4.17 y 4.18 se muestra la temperatura y humedad del sólido dentro del lecho fluidizado para dos temperaturas de consigna de 75 y 125°C (temperaturas de lecho deseada). Como puede observarse, la temperatura real oscila en un intervalo de valores muy amplio. Esto es debido fundamentalmente a la alimentación por pulsos del sólido presecado, del lecho móvil al lecho fluidizado. Este factor motiva caídas momentáneas de temperatura del lecho a valores cercanos a la temperatura de bulbo húmedo. Las oscilaciones son más amplias cuando se intenta operar a 125°C Figura 4.17, si bien la efectividad del secado es mucho mejor que a 75°C, Figura 4.18.

Los perfiles de humedad dentro del lecho móvil se han medido sacando muestras de tres niveles (A, B, C) situadas a las alturas que se indican en la Figura 4.19.

En la tabla 4.3 se muestran las alturas a las que se han tomado muestras en el secadero fluidizado/móvil y las humedades correspondientes a cada uno de los niveles de la zona de lecho móvil, así como la humedad del sólido en el lecho fluidizado. Los dos primeros experimentos se diferencian únicamente en la humedad inicial del orujo húmedo alimentado (31 y 46.7% respectivamente). El caudal de aire utilizado en los tres experimentos fue de 5 L/s (velocidad superficial en el lecho móvil de 1.1 m/s). Los perfiles de los experimentos 1 y 2, han sido medidos en un proceso de secado donde la temperatura de entrada del aire al secadero fue de 147°C y la temperatura máxima (de consigna) dentro del lecho fluidizado de 125°C. La temperatura del aire a la salida del lecho móvil estuvo comprendida entre 31 y 38 °C. Por otro lado, los perfiles del experimento 3 han sido medidos en una operación de secado donde la temperatura de entrada del aire fue de 110°C y la temperatura dentro del lecho de 75°C (consigna). La temperatura del aire a la salida del lecho móvil estuvo comprendida entre 30 y 34°C. Como puede observarse, en los niveles A y B la humedad es prácticamente la misma, y el mayor porcentaje de secado tiene lugar entre la sección B y C (zona tronco-cónica del lecho móvil).

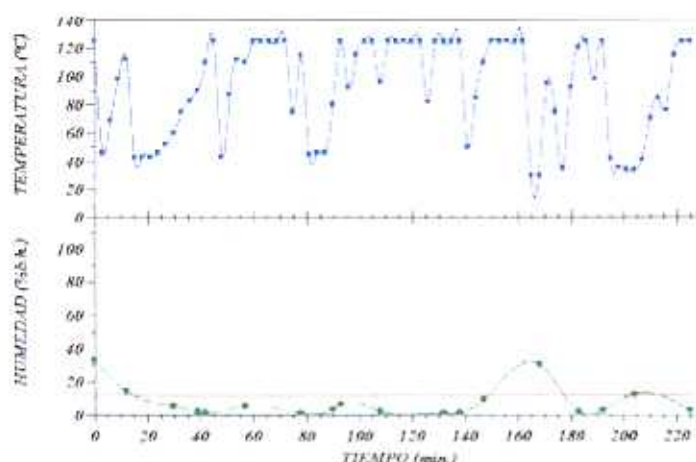


Figura. 4.17.- Curvas de temperatura y humedad en la parte fluidizada del secadero fluidizado/móvil ($T=125^{\circ}\text{C}$; 5 L/s; 1.1 m/s); (●) humedad; (■) Temperatura del lecho fluidizado; (—) Limite de extractabilidad.

En el lecho móvil se produce un secado previo del orujo húmedo alimentado. Como se refleja en la tabla 4.4, en base a los porcentajes mostrados en la tabla 4.3, el porcentaje medio de secado dentro del lecho móvil viene a representar el 50% del secado total del sólido. Esta operación previa de secado facilita el proceso global de secado dentro del lecho fluidizado, facilita la alimentación del sólido presecado a dicho lecho y elimina los finos arrastrados por el lecho fluidizado. Además, dado que la temperatura a la que se ha realizado el secado en el lecho móvil es de 35-45 °C, esta operación previa de secado no tiene repercusión negativa en la calidad del orujo para las utilidades posteriores (especialmente extracción del aceite de orujo).

Tabla 4.3.- Perfil de humedades.

		EXP n° 1	EXP n° 2	EXP n° 3
ALTURA (cm)		HUMEDAD (%bh) ($T=125^{\circ}\text{C}$)	HUMEDAD (%bh) ($T=125^{\circ}\text{C}$)	HUMEDAD (%bh) ($T=75^{\circ}\text{C}$)
A	26	31.0	46.7	38.2
B	18.5	30.5	46.6	37.6
C	0	17.7	31.7	22.9
D	FLUIDIZADO	8.0	10.0	9.0

Tabla 4.4.- Porcentajes de secado en los lechos fluidizado y móvil.

	EXP n°1	EXP n°2	EXP n°3
	PORCENTAJE(%) ($T=125^{\circ}\text{C}$)	PORCENTAJE(%) ($T=125^{\circ}\text{C}$)	PORCENTAJE(%) ($T=75^{\circ}\text{C}$)
L. FLUIDIZADO	42	59	48
L. MÓVIL	58	41	52

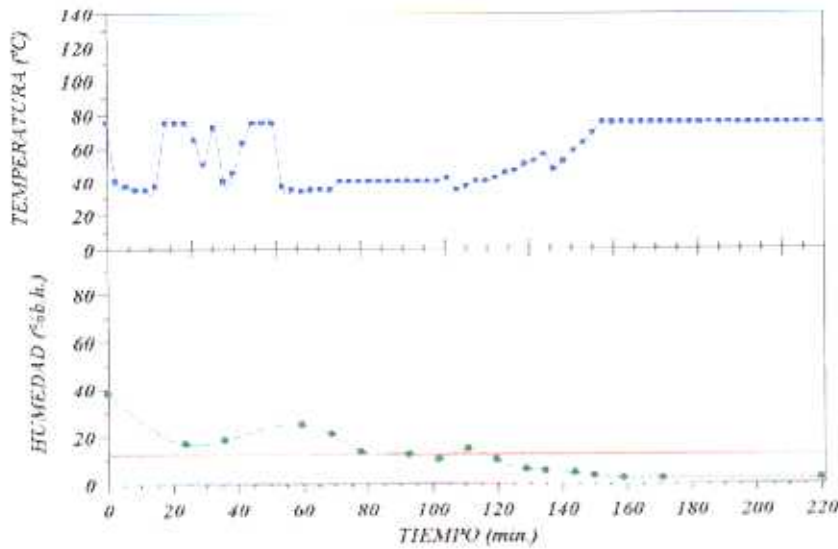


Figura. 4.18. Curvas de temperatura y humedad de la parte fluidizada del secadero fluidizado/móvil; ($T=75^{\circ}\text{C}$; 5 L/s; 1.1 m/s) (●) humedad; (■) Temperatura del lecho fluidizado; (—) Límite de extractabilidad.

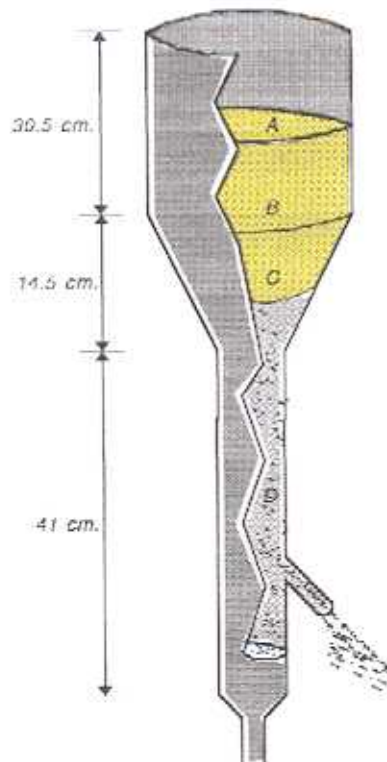


Figura 4.19.- Perfil de humedad en el secadero, (todos los niveles están referidos al nivel C del lecho móvil)



4.3.5.- Secado en lecho fluidizado/móvil

Para la optimación final de los parámetros propios del secadero fluidizado/móvil, tales como la temperatura de operación, porcentaje de mezcla del sólido a tratar, caudal de aire empleado, etc., se han realizado los experimentos mostrados en la tabla 4.5.

En todos los experimentos se ha cargado el lecho móvil con orujo húmedo de humedad comprendida entre 42 y 65%, (grado de mezcla entre 53 y 80%). La temperatura del aire de entrada estaba comprendida entre 60 y 160°C y la temperatura dentro del lecho entre 50 y 130°C. Los caudales de aire empleados están comprendidos entre 4 y 5 L/s.

Por medio de la gravedad y el contacto con el fluido caliente, el orujo húmedo del lecho móvil va descendiendo en el lecho y se va secando. Cuando llega a la zona tronco-cónica, se alimenta al lecho fluidizado con una humedad inferior a la inicial, aspecto ya tratado en el apartado 4.3.4. La alimentación del sólido presecado al lecho fluidizado produce una disminución de la temperatura dentro del mismo aproximándose ésta a la temperatura de bulbo húmedo. Los perfiles de temperatura que se generan dentro del lecho son semejantes a los mostrados en las Figuras 4.17 y 4.18. Finalmente, el orujo seco se va extrayendo del lecho fluidizado por medio de una válvula J.

En la Tabla 4.5 se muestran las condiciones y características de los experimentos realizados, reflejando cuáles de ellos han sido empleados para verificar los porcentajes de mezcla óptimas (tratado anteriormente en el apartado 3.3), caudales de aire (que se ha tratado más detalladamente en el apartado 4.3.3.2) y optimar la temperatura del lecho fluidizado.

Se ha analizado la influencia de la temperatura en la humedad del sólido a la salida y en la calidad del aceite contenido en el orujo seco, reflejando estos datos en la tabla 4.6, que se comentarán más adelante.

En las siguientes gráficas se muestran curvas de secado para diferentes condiciones de operación. En cada una se muestra:

- **Temperatura de entrada del aire**, que se mantiene aproximadamente constante durante la totalidad del experimento, mostrando una variación de aproximadamente $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- **Temperatura del lecho**, que depende de varios factores, entre los que cabe destacar: la temperatura de entrada del aire, temperatura húmeda del sólido y los pulsos de



alimentación del sólido presecado. Por ello, es difícil mantener la temperatura dentro del lecho constante y por ello estos valores en adelante se expresarán siempre con intervalos más o menos amplios.

- **Humedad del sólido**, es la humedad del sólido medida a la salida del secadero, que depende de múltiples factores tales como: tiempo de residencia, temperaturas del fluido a la entrada y en el lecho, calidad del contacto dentro del secadero, porcentaje de mezcla, etc.

Tabla 4.5.- Experimentos de secado en lecho fluidizado/móvil

CONDICIONES DE OPERACIÓN					CARACTERÍSTICAS	
$T_{entrada}$ (°C)	T_{lecho} (°C)	$H_{inicial}$ (%bh)	M_{mezcla} (%)	Q_{aire} (L/s)	Exp n°	OBJETIVOS
60	50	55.78	65	4.5	1	Secado en continuo a bajas temperaturas y optimización de la temperatura de operación
60	50	47.2	60	4.5	2	
60	50	42.05	60	4.5	3	
75	60	47.69	60	4.5	4	
85	75	43.51	60	4.5	5	Verificación del grado de mezcla optimización de la temperatura de operación
90	75	52.78	75	4.5	6	
90	75	52.52	75	4.5	7	
120	100	53.25	80	4.5	8	Optimización de la temperatura de operación
115	100	65	60	4.5	9	
150	110	46.13	60	4.5	10	Optimización de la temperatura de operación.
150	120	45.15	65	4.5	11	
150	120	50	53	4	12	Verificación del caudal de fluido
150	120	50	65	4.5	13	Verificación del caudal de fluido
140	120	51.24	64	5	14	Verificación del caudal de fluido
160	120	47.54	63	4.5	15	Verificación del caudal de fluido
160	120	46.72	63	4.5	16	Verificación del caudal de fluido
140	125	47.6	60	4.5	17	Optimización de la temperatura de operación
160	125	22	100	4.5	18	

En la Figura 4.20 (a) se muestra los resultados obtenidos en el experimento 18, cuyas condiciones de operación se muestran en la tabla 4.5. Se muestra la curva de secado con la



representación de la temperatura dentro del lecho y a la entrada del mismo. Como se puede observar, la temperatura de entrada del aire presenta un valor prácticamente constante en torno a 83-86 °C. Sin embargo, la temperatura del lecho es más variable, mostrando un amplio margen de oscilaciones comprendido entre 50 y 75 °C. Cabe destacar la influencia de la temperatura de bulbo húmedo del sólido procedente del lecho móvil, más baja que la del sólido que se encuentra en el fluidizado, apreciándose ésta en la disminución drástica de la temperatura que se produce principalmente en los minutos 75, 145 y 185, coincidiendo con la alimentación de orujo presecado del lecho móvil al fluidizado.

El tiempo empleado para la recuperación de la temperatura de consigna depende de múltiples factores, entre los que cabe destacar la temperatura del aire de entrada (si el aporte energético unitario es mayor, el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de consigna es menor), la cantidad de sólido alimentado al lecho en cada pulso (a igualdad de la temperatura del aire de entrada, una mayor cantidad de sólido presecado alimentado al lecho fluidizado requiere un aporte energético mayor y por lo tanto el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de consigna es mayor).

En la Figura 4.20. (b) se muestran los resultados obtenidos en el experimento 6, cuyas condiciones de operación se recogen en la tabla 4.5. Las perturbaciones de temperatura dentro del lecho son de nuevo debidas al ritmo de alimentación del sólido parcialmente seco desde el lecho móvil al fluidizado. Cabe destacar que la humedad de salida del secadero es prácticamente constante pasado un tiempo de 15 a 20 minutos, esto es conseguido mediante el sistema de control que se tratará posteriormente.

La diferencia entre ambas curvas de secado (Figuras 4.20 (a) y (b)) es fundamentalmente la humedad inicial del sólido a secar. En cualquiera de los casos, el tiempo de contacto, dentro del lecho fluidizado, requerido por el sólido húmedo para dotar al orujo de las condiciones de extractabilidad adecuadas (humedad inferior al 12 %), para una temperatura de consigna de 75°C, es aproximadamente 15 minutos. Este tiempo es considerablemente menor que en el caso de secado ambiental, como se puede deducir si se comparan las Figuras 4.6 y 4.20 y menor que en el secado en lecho fluidizado como se observa comparando las Figuras 4.11 y 4.20. Esto es debido a la mejora en el tipo de contacto y aprovechamiento energético que se produce al combinar el lecho fluidizado y móvil.



Como algunas temperaturas de secado están por debajo del punto de ebullición del líquido. En estos casos, se confiere al producto a secar una calidad analítica adecuada, desde el punto de vista de acidez y contenido graso del aceite extraído, como se muestra en la tabla 4.6. No obstante, desde el punto de vista industrial, para este intervalo de temperaturas, un tiempo de residencia de 15 a 20 minutos es prohibitivo a la hora de realizar una planificación de secado con vistas a una posterior ampliación de escala. Por ello, para disminuir el tiempo de residencia, se ensayaron temperaturas, dentro del lecho, más elevadas, confiriendo a dicha operación básica un carácter industrialmente más productivo. De igual forma se analizaron los parámetros de calidad del aceite que se extrae de dicho orujo seco tratado en estas condiciones, para encontrar una solución de compromiso entre ambas condiciones la calidad y la capacidad de producción.

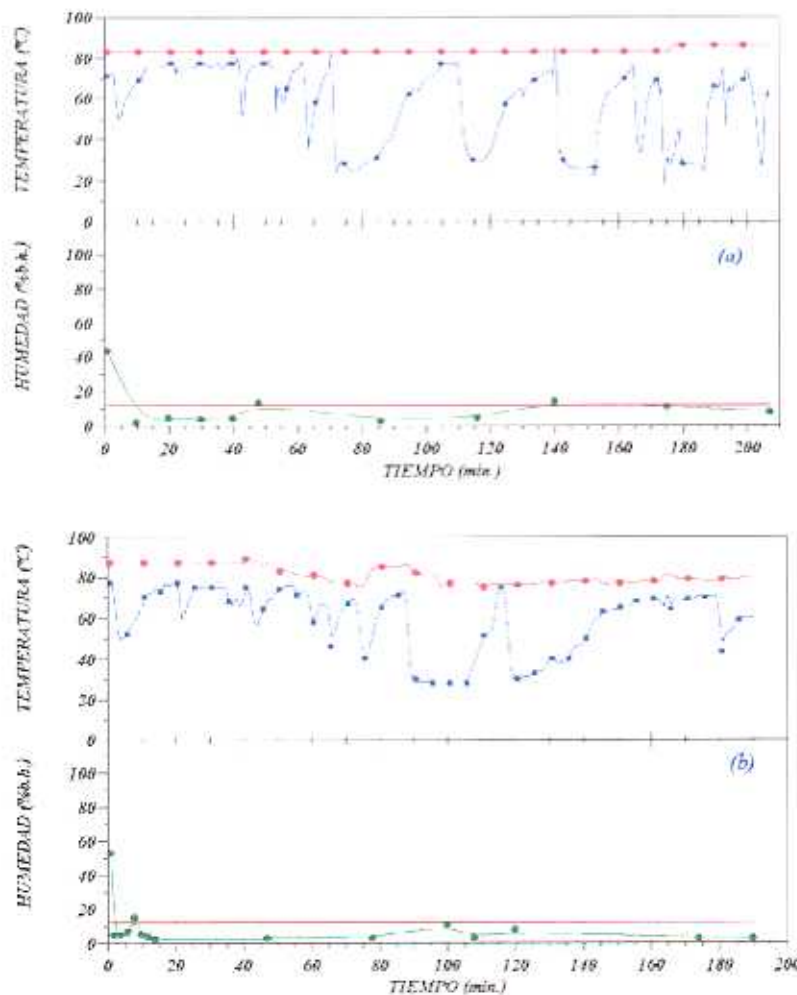


Figura 4.20.- Secado de orujo húmedo en lecho fluidizado/móvil, 4.5 L/s; (●) Temperatura del aire de entrada; (■) Temperatura del lecho; (●) Humedad del sólido seco; (—) Limite de extractabilidad: (a) Humedad inicial de 45% (b) Humedad inicial 53%.



Cabe destacar que aunque el aceite extraído del orujo seco se ve sometido a un tratamiento de refinado posterior, para capacitar a dicho aceite para el consumo humano, el coste de refinado de éste es proporcional a la calidad del orujo seco. Si la calidad del aceite extraído es muy bajo podría darse el caso de que el proceso de refinado fuese prohibitivo desde el punto de vista técnico y sobre todo desde el punto de vista económico. Por todo ello es necesario que el orujo seco tenga la mejor calidad posible, ya que de esta forma los costes de los tratamientos posteriores serán menores.

Teniendo en cuenta las condiciones de operación tratadas en el secado dentro de un lecho fluidizado exclusivamente, se han ensayado temperaturas de lecho comprendidas entre 60 y 125 °C, encontrando que para la temperatura de 125°C, según se muestra en la Figura 4.21, el tiempo de residencia se reduce a menos de 4 minutos, valor que resulta adecuado para un posible escalado. De igual forma, según se muestra en la tabla 4.6, las características del aceite extraído de este orujo seco, como era de esperar, pierde calidad en cuanto a la acidez se refiere, frente al anterior cuyas temperaturas de operación eran menores. A pesar de todo esto, dichas condiciones de acidez no dificultarían el tratamiento de refinado posterior. Teniendo en cuenta la temperatura a la que se desarrolla el secado (125°C), el tiempo de residencia que lleva implícito éste (4 minutos) y la calidad del aceite extraído, éstas condiciones son adecuadas para el proceso de secado con vistas a un proceso extractivo posterior, así como para otras utilidades paralelas (compostaje, etc.).

Como se muestra en la Figura 4.21, la temperatura de entrada se mantiene en un intervalo estrecho (140-160°C). Por contra, la temperatura del lecho presenta un perfil más heterogéneo, esto es debido, como ya se ha mencionado, a la alimentación del sólido parcialmente seco desde el lecho móvil al fluidizado alcanzando de esta forma la temperatura de bulbo húmedo. Sin embargo, esta circunstancia no afecta en exceso a la humedad de salida del secadero, puesto que dentro del lecho fluidizado la humedad presenta un valor aproximadamente constante y uniforme.

Tabla 4.6.- Humedad de salida y calidad del aceite extraído en función de la temperatura del lecho

TEMPERATURA DEL LECHO (°C)	HUMEDAD FINAL (%)	CONTENIDO GRASO (%)	ACIDEZ (%)
20-23	6.8	3.2	14.06
60	9.7		19.05
110	6.9	9.55	30.89
120	5.05	10.15	31.03
125	5.8	11.1	31.38

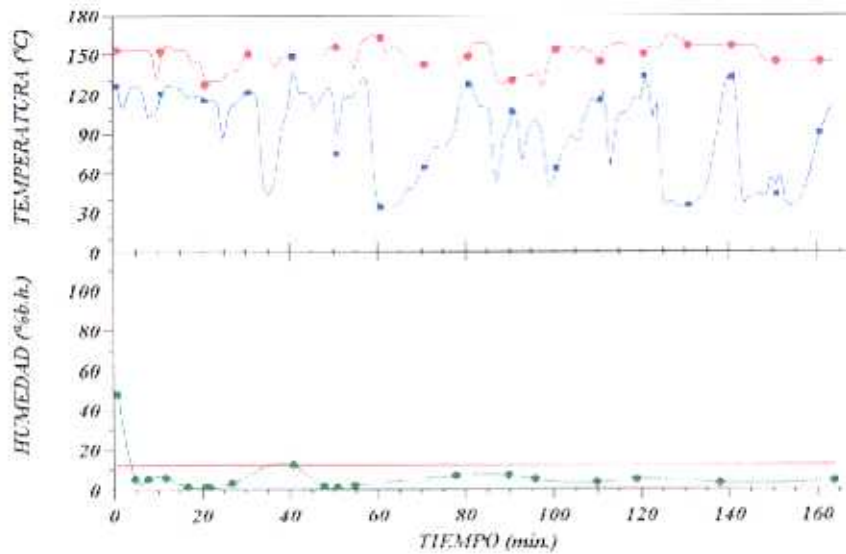


Figura 4.21.- Curva de secado para temperatura del lecho entre 110 y 120 °C; (●) Temperatura del aire de entrada; (■) Temperatura del lecho; (●) Humedad del sólido seco; (—) Límite de extractabilidad.

Como se puede observar en la tabla 4.6. las condiciones menos agresivas para el proceso de secado corresponden a aquellas cuyas temperaturas de operación son menores. Sin embargo se ha seleccionado un intervalo de operación de temperaturas más elevado que si bien producen un aceite de orujo de peor calidad en cuanto a su acidez, técnicamente puede ser refinado y, desde el punto de vista del tiempo de residencia, se confiere a la operación un carácter apropiado para un posible aumento de escala. Los intervalos y condiciones de operación, en cuanto a las temperaturas se refiere, se muestran en la tabla 4.7.

Tabla 4.7.- Rango de temperaturas de operación

TEMPERATURAS (°C)	
AIRE DE ENTRADA	140-160
LECHO FLUIDIZADO	110-125



4.4.- MODELIZACIÓN

4.4.1.- Cinética de secado

Para el cálculo de la cinética de secado en el lecho fluidizado es necesario obtener curvas de secado desde la humedad inicial hasta una humedad cercana a la de equilibrio. El orujo fresco presenta una humedad, como se ha comentado anteriormente, del orden de 60-65%. Esta humedad confiere al sólido unas características fluidodinámicas que imposibilitan totalmente su fluidización. Dicho material se encuentra aglomerado por la cantidad de agua que contiene, lo que hace que no sea técnicamente factible determinar experimentalmente la cinética de secado del orujo fresco en lecho fluidizado ni móvil. Por ello, y para la estimación de la cinética de secado, se ha utilizado orujo húmedo, que presenta unas características fluidodinámicas adecuadas que permiten la realización de secados completos desde la humedad inicial hasta la humedad de equilibrio.

Se ha utilizado orujo húmedo con un porcentaje de mezcla del 70%, valor que se encuentra en el intervalo óptimo determinado previamente (apartado 3.3) y que presenta una humedad inicial de aproximadamente el 40%. Se han realizado distintas series de experimentos de secado en lecho fluidizado. En dichos experimentos se ha variado la temperatura del aire de entrada, temperatura del lecho y caudal del aire utilizado. Concretamente, se han seleccionado tres temperaturas de lecho: 75, 100 y 125°C, y caudales de aire de 4, 4.8 y 5 L/s, que se traduce en un caudal másico del aire de 6110, 6855 y 7450 kg/(h·m²), respectivamente.

Los resultados obtenidos en la experimentación realizada se muestran en las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13, utilizadas y mostradas anteriormente para estudiar las dependencias de la operación de secado con el caudal de aire de entrada y la temperatura del aire de entrada y del lecho fluidizado.

4.4.1.1.- Período de inducción

Según se ha mencionado en el apartado 1.2.1.2. y como se muestra en las Figuras 4.22, 4.23 y 4.24, el orujo húmedo, en su proceso de secado, presenta un período de inducción que aparece para humedades superiores al 27%. En dichas Figuras la humedad final es, en su totalidad, la humedad de equilibrio correspondiente a la humedad relativa del aire a la temperatura de operación.

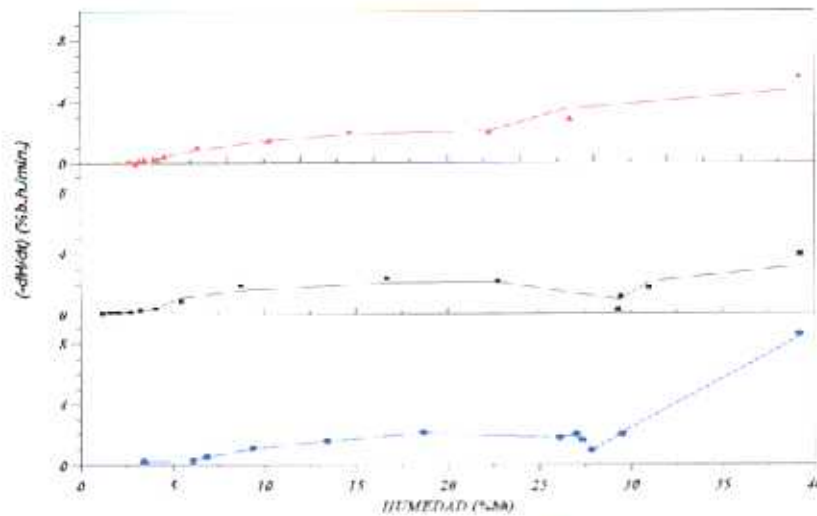


Figura 4.22.- Velocidad de secado ($G=6110 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$), (●) 75°C ; (■) 100°C ; (▲) 125°C .

En las figuras 4.22, 4.23 y 4.24, se muestra la variación de la pendiente de la curva de secado con la humedad del sólido y para tres caudales de aire estudiados, la pendiente de la curva de secado en el período inductivo depende de la humedad del orujo, de la temperatura y caudal del aire alimentado. En general, la pendiente de la curva de secado disminuye con la humedad del orujo, salvo para un caudal de aire de $7450 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. La pendiente de las curvas de velocidad de secado, Figuras 4.22, 4.23 y 4.24 dentro del período de inducción, es mayor cuando el caudal de aire es de $6110 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ (velocidad de secado menor) y es negativa cuando el caudal másico de aire es de $7450 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ (velocidad de secado mayor). Caudales de aire grandes producen una velocidad inicial de secado menor hecho que no tiene un significado claro por tratarse del período de inducción.

Dicho período es un período inestable y difícilmente reproducible, por lo que no se ha considerado su estudio más a fondo a efectos de diseño, escalado ni de establecimiento de la cinética de secado, ya que la existencia de este período así como su aspecto depende de las condiciones del agua retenida en el sólido, de las condiciones iniciales del aire y del sólido.

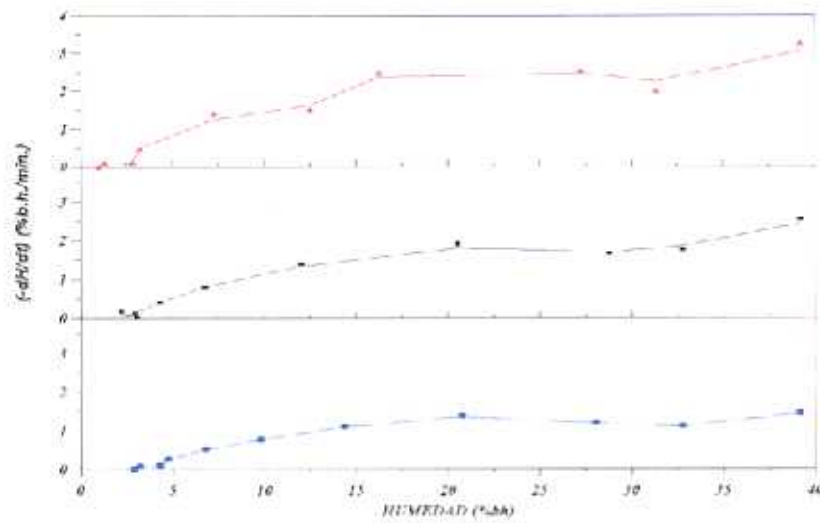


Figura 4.23.- Velocidad de secado ($G=6855 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$), (●) 75°C ; (■) 100°C ; (▲) 125°C .

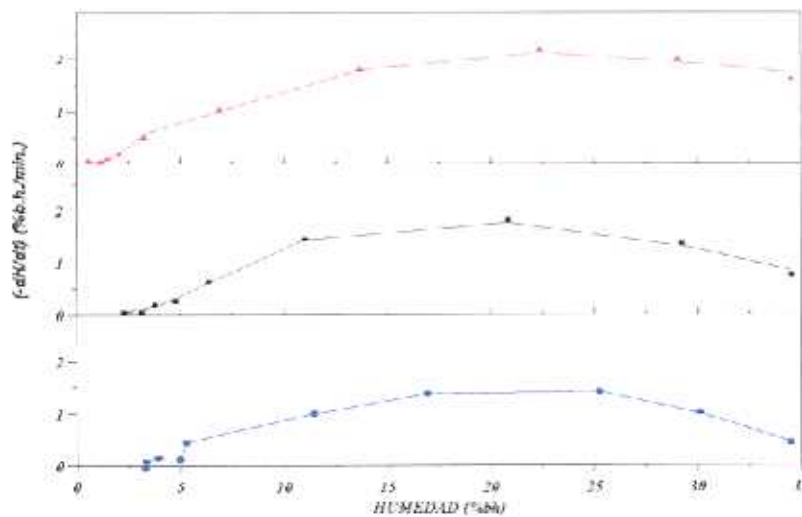


Figura 4.24.- Velocidad de secado ($G=7450 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$), (●) 75°C ; (■) 100°C ; (▲) 125°C .

4.4.1.2.- Periodo de velocidad de secado constante

Se ha observado la presencia de este periodo en la casi totalidad de los experimentos de secado de orujo húmedo. En los experimentos realizados en la presente investigación, el intervalo de humedades correspondiente a este periodo va del 20% al 27%.



Se considerará que el aporte energético procede exclusivamente del aire, siendo despreciables otros mecanismos de transmisión de calor. Por ello, para este periodo es aplicable la siguiente relación:

$$-\left(\frac{dX}{dt}\right) = \frac{k_x \cdot A}{\rho_s} (H_i - H) = \frac{h \cdot A}{\rho_s \cdot \lambda_w} (T - T_i) \quad (4.2)$$

donde A es m² de interfase/m³ de lecho de material; λ_w calor latente de vaporización del líquido (Kj/kg); T_i temperatura en la interfase (°C); T temperatura en el seno del fluido(°C); k_x coeficiente de transferencia de materia; h coeficiente individual de transferencia de energía; X humedad del sólido; t tiempo(h); H_i Humedad en la interfase de la partícula; H humedad del aire; dX/dt velocidad de secado(kg_{agua}/(kg_{st}·h)).

Según Wenzel y White (Wenzel et al, 1953), como premisas se considera que las propiedades del aire utilizado no varían apreciablemente en el intervalo de temperaturas de lecho utilizado (75-125°C). Los coeficientes individuales de transporte de calor y de materia podrían correlacionarse con la velocidad másica del fluido (G), diámetro de partícula (dp), calor sensible del aire (C_s), de la siguiente manera:

$$k_x = B \frac{G^n}{dp^{(1-n)}} \quad (4.3)$$

$$h = C \frac{G^n}{dp^{(1-n)}} C_t^{(1/3)} \quad (4.4)$$

De las ecs 4.2, 4.3 y 4.4 se deduce la siguiente expresión:

$$-\left(\frac{dX}{dt}\right) = B' \cdot G^n = C' \cdot G^n \quad (4.5)$$



Tomando logaritmos en la expresión (4.5) se tiene:

$$\log \left[- \left(\frac{dX}{dt} \right) \right] = \log B' + n \cdot \log G \quad (4.6)$$

Si se representa la velocidad frente al caudal másico, en función de la ec. 4.6, se podrá obtener el valor de n y de B' . En la tabla 4.8 se muestran los datos de velocidad en función de los caudales másicos:

Tabla 4.8.- Velocidad de secado constante ($\text{kg}_{\text{orujo}}/(\text{kg}_{\text{sh}} \cdot \text{h})$)

G ($\text{kg.}/\text{h} \cdot \text{m}^2$)	75°C	100°C	125°C
6110	51.6	90	135
6855	66	108.6	162
7450	72	120	166

Las rectas generadas del ajuste anteriormente señaladas se muestran en la Figura 4.25.

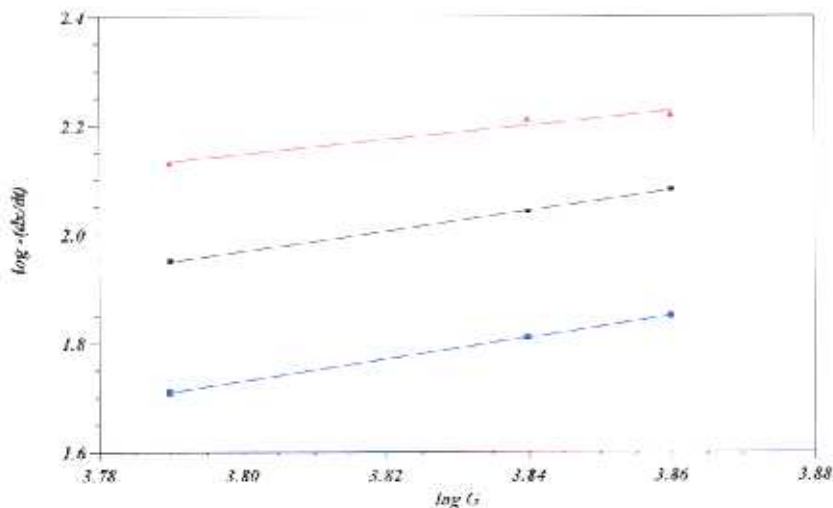


Figura 4.25.- Rectas de regresión de la ec 4.6

(●) 75°C , 4.08 L/s, 0.89 m/s; (■) 100°C , 4.1 L/s, 0.9 m/s; (▲) 125°C , 4.1 L/s, 0.9 m/s.



En la tabla 4.9 Se muestra las rectas de ajustes y los coeficientes de correlación de cada una de las rectas que se muestran en la Figura 4.25.

Tabla 4.9.- Rectas de ajuste

LEYENDA	RECTA DE AJUSTE	r^2
(●) 75°C, 4.08 L/s, 0.89 m/s	$Y = -5.86 + 2 \cdot X$	1
(■) 100°C, 4.1 L/s, 0.9 m/s	$Y = -5.05 + 1.85 \cdot X$	0.999
(▲) 125°C, 4.1 L/s, 0.9 m/s	$Y = -2.97 + 1.35 \cdot X$	0.96

El valor del parámetro n presente en la ec 4.6, se ha cuantificado como una media entre los tres valores de las pendientes propias de las rectas representadas en la Figura 4.25, el valor es de $n = 1.72$. En la tabla 4.10 se muestra la variación de B' con $(H_i - H)$, λ_w , C_i , $(T - T_i)$.

Tabla 4.10- Variación de B' con $(H_i - H)$, λ_w , C_i , $(T - T_i)$

T (°C)	$(H_i - H)$ (kg aire/kg as)	$(T - T_i)$ (°C)	λ_w (kJ/kg)	C_i (kJ/kg·°C)	$C_i^{(1/3)} \frac{(T - T_i)}{\lambda_w}$	$B' = C'$
75	0.01846	46.45	2318.1	0.992	0.02	$3.06 \cdot 10^6$
100	0.02541	66.2	2255.7	0.992	0.03	$6.31 \cdot 10^5$
125	0.03236	85.95	2183.4	0.992	0.04	-

Para analizar cuantitativamente la variación de B' con respecto a $(H_i - H)$ y $C_i^{(1/3)} \frac{(T - T_i)}{\lambda_w}$ con el valor de B' a una regresión lineal del tipo $y = mx$, se obtiene:

$$B' = 8.6 \cdot 10^{-2} \cdot (H_w - H) \quad (4.7)$$

$$C' = 6 \cdot 10^{-2} \cdot C_i^{(1/3)} \frac{(T - T_i)}{\lambda_w} \quad (4.8)$$

En función de los datos calculados anteriormente y las ecs 4.5, 4.7, 4.8. La ecuación cinética de secado en el periodo de velocidad constante se muestra en la ec 4.9.



$$-\left(\frac{dX}{dt}\right) = 8.6 \cdot 10^{-2} \cdot G^{1.72} \cdot (H_i - H) = 6 \cdot 10^{-2} \cdot G^{1.72} \cdot C_i^{(1/3)} \cdot \left(\frac{T - T_i}{\lambda_w}\right) \quad (4.9)$$

4.4.1.3.- Periodo de velocidad de secado decreciente.

A partir de las pendientes de las curvas de secado, Figuras 4.22, 4.23 y 4.24 se aprecia la existencia de tres zonas diferentes: una zona de inducción inicial, propia de humedades elevadas, otra zona de velocidad de secado constante, tratado anteriormente y que corresponde a un tramo casi horizontal en dichas figuras y por último, un periodo de velocidad de secado decreciente, que se tratará en este apartado.

A la vista de dichas figuras, se considera que existe un único período de velocidad decreciente, donde la difusión externa es la etapa controlante dentro de dicho periodo del proceso de secado. Al igual que en los cálculos anteriores se analizaron las pendientes de las curvas de la velocidad de secado, Figuras 4.22, 4.23 y 4.24, y se calcularon los coeficientes b y k de la ec 4.10

$$-\frac{dX}{dt} = b + k \frac{(X - X^*)}{(1-x) \cdot (1-X^*)} \quad (4.10)$$

realizando un ajuste, tal y como se hizo en el período anterior, y teniendo en cuenta las dependencias que presenta la cinética en el periodo de velocidad de secado decreciente, con respecto al caudal másico, la temperatura dentro del lecho fluidizado y humedad del sólido, se ha obtenido la ecuación representativa siguiente.

$$-\left(\frac{dX}{dt}\right) = 1.4 \cdot 10^{-5} \cdot G^{1.63} + 0.123 \cdot e^{\left(\frac{-503}{T}\right)} \cdot G^{0.62} \cdot \left(\frac{(X - X^*)}{(1-X) \cdot (1-X^*)}\right) \quad (4.11)$$

En esta ecuación se muestra la dependencia, en este periodo, de la velocidad de secado con respecto a la temperatura de operación, caudal másico de aire y de la humedad libre del sólido húmedo. Teniendo en cuenta que dicho período de secado está controlado por procesos difusivos,



en el segundo miembro del segundo término se tiene en cuenta la humedad libre del sólido, como la diferencia de la humedad del sólido y de la humedad de equilibrio para las condiciones de operación.

4.4.2.- Redes neuronales aplicadas a la modelización

En la operación de secado de orujo existe una gran cantidad de factores que afectan, entre los que cabe destacar: la composición química (azúcares, acidez, etc.) y las propiedades físicas del sólido (densidad, humedad, viscosidad, etc.). Cada una de ellas varía dependiendo de múltiples factores previos no relacionados con la operación, entre los más sobresalientes cabe destacar: tipo de orujo fresco (agotado o no), tiempo y condiciones de almacenamiento, propiedades fisico-químicas previas al almacenamiento, tratamientos previos a la operación de secado, etc.. Por lo que las ecuaciones cinéticas obtenidas en el apartado anterior solamente son válidas para el secado en lecho fluidizado y es específica del orujo utilizado. De todo ello se puede deducir que la modelización de cualquier secadero para tratar orujo fresco es muy compleja por los múltiples factores que afectan al proceso de secado y la variabilidad que presentan los mismos.

Para poder establecer una nueva vía de modelización, del secado en lecho fluidizado/móvil, se ha utilizado un modelo basado en redes neuronales artificiales que ha sido programado en BASIC y cuyo código es mostrado en el apéndice. La red que se ha empleado ha sido un perceptron multicapa, que presenta la posibilidad de poder adaptarse a problemas de dinámica no lineal.

4.4.2.1.-Proceso de aprendizaje

El perceptron multicapa utilizado presenta tres capas (un nivel de entrada, una capa intermedia u oculta y una capa de salida) según se muestra en la figura 1.20; como función de transferencia la función sigmoide mostrada en la ec 1.14; la optimización de los pesos se ha realizado por el proceso de retropropagación comentado en el apartado 1.4.2.1.3; Todas las variables introducidas a la red neuronal están normalizadas entre 0 y 1.

El proceso de aprendizaje consiste en presentar a la red una muestra de aprendizaje compuesta por unos datos de entrada (una temperatura de entrada del aire al lecho fluidizado a tiempo t , una temperatura del lecho a tiempo t y un dato de humedad de salida del sólido a tiempo



t) y un dato deseado de salida (dato de humedad del sólido a tiempo $t+1$). El proceso de aprendizaje consiste en la predicción, a partir de unos pesos aleatorios, de un dato de humedad, este dato predicho se compara con el dato real mostrado a la salida de la red, generando de esta forma un error de aprendizaje que se empleará, en la optimación de los pesos de la red neuronal. El proceso de aprendizaje finalizará cuando el error de aprendizaje comience a aumentar, independientemente del valor que presente. En esta fase del proceso de aprendizaje se habrán generado unos pesos adecuados para la modelización y posterior predicción.

El proceso de aprendizaje de las redes se ha llevado a cabo usando datos obtenidos experimentalmente. Cada fichero de datos utilizado es una matriz de 200×4 cuyas columnas están compuestas por: tiempo, temperatura de entrada del aire, temperatura del lecho y humedad de salida. La variable que se pretende predecir es la humedad de salida en el instante de tiempo posterior al cálculo teniendo en cuenta que el incremento de tiempo es de 1s. Los datos utilizados en el adiestramiento de la red son similares a los mostrados en las Figuras 4.10, 4.20 y 4.21. donde las humedades iniciales del sólido son aproximadamente del 50%, el caudal de aire es de 4.1 L/s y las temperaturas dentro del lecho fluidizados se encuentran comprendidas entre 80 y 120°C.

Como pasos previos a la modelización del proceso de secado se ha optimado la topología de la red para minimizar el error de salida y seleccionar el coeficiente de aprendizaje más adecuado.

Optimación de la topología de la red: Se han ensayado diversas topologías utilizando las mismas muestras de aprendizaje. En cada proceso de aprendizaje se calculaba el error en función del tiempo de predicción, como la diferencia entre la humedad predicha y la real. En la Figura 4.26, se muestran distintos perfiles de error para cada una de las topologías analizadas, todas ellas con un coeficiente de aprendizaje de 0.5. Se ha fijado el número de nodos de entrada a tres a los que se alimenta la humedad del sólido a tiempo t y las temperaturas de entrada del aire y del lecho a tiempo t . En el presente trabajo el número de neuronas de salida se ha fijado en una, la humedad de salida del sólido a tiempo $t+1$, únicamente para el proceso de modelizado. El número de neuronas de salida pueden ser variadas conforme al uso que se establezca para la red (modelización, control, etc.).

Se han estudiado cinco topologías diferentes. En la Figura 4.26. se muestra la variación del error con el número de veces que se presenta una muestra a la red así como el error mínimo, que se ha alcanzado en la etapa de aprendizaje. En la Figura 4.26. (a) se



muestran los perfiles de error para dos topologías diferentes (1 y 2 neuronas en la capa oculta). Como se puede observar, la pendiente de decrecimiento y el error final es similar en los dos casos. En la Figura 4.26. (b) se muestran los perfiles de error para tres topologías diferentes (3, 4 y 5 neuronas en la capa oculta). Como se puede observar, cabe destacar una diferencia en la pendiente de decrecimiento del error aunque el error final es similar para las tres topologías estudiadas.

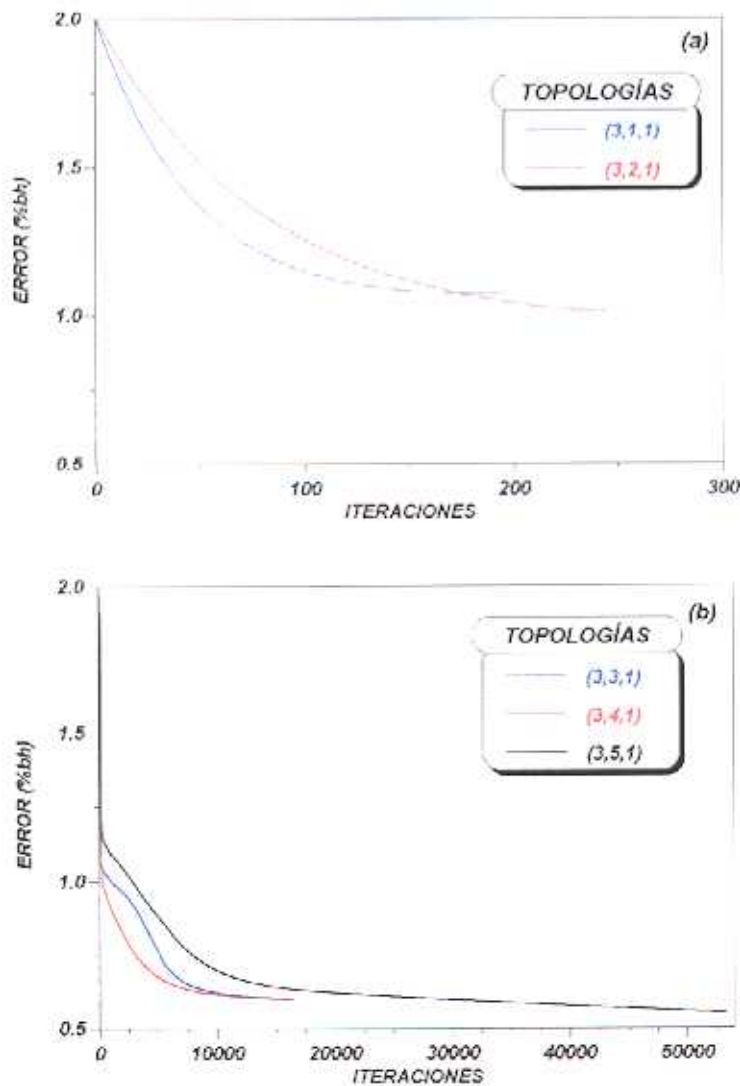


Figura 4.26.- Perfiles de error para distintas topologías, ($\mu=0.5$).



La topología seleccionada resulta de un equilibrio entre la sencillez de cálculo (reducido número de neuronas), la precisión a la hora de modelizar el proceso de secado y las condiciones de decrecimiento del error (pendiente, error máximo y mínimo, etc.). Teniendo en cuenta todas estas características, se ha seleccionado una topología de 3 nodos de entrada, 4 neuronas en la capa oculta y una neurona de salida, ya que esta configuración presenta el menor error final (con respecto a las representadas en la Figura 4.26 (a)), y la pendiente de decrecimiento del error es mayor. Por otro lado el tiempo invertido en alcanzar el error mínimo es, en comparación con otras configuraciones, reducido. Aspecto útil y necesario para realizar predicciones con un período de aprendizaje corto donde un error medio de $5 \cdot 10^{-3}$ %bh no es relevante en el uso habitual de la red neuronal artificial. Esto es adecuado si dicha red es utilizada en labores de control donde es adecuado un ajuste rápido (utilizando un pequeño número de iteraciones) de pesos durante el proceso de control del secado.

Optimación del coeficiente de aprendizaje: Este coeficiente es un parámetro que controla tanto el grado de adaptabilidad que presenta la red al proceso a modelizar como la capacidad de ésta de conservar la información ya adquirida en aprendizajes previos. Para dicha selección se han utilizado los perfiles de error del proceso de aprendizaje igual que en el proceso de selección de la topología. Se han estudiado la influencia de coeficientes de aprendizaje comprendidos entre 0.1 y 1. En la Figura 4.27 se muestran los perfiles de error frente al tiempo.

Como se puede apreciar en la Figura 4.27, la mayor variación de los coeficientes de aprendizaje con el número de interacciones están representados por perfiles pertenecientes a $\mu=0.85$ y $\mu=1$. La diferencia entre los perfiles pertenecientes a dichos coeficientes es pequeña con lo que se puede seleccionar cualquiera de los dos coeficientes. Coeficientes próximos a 1 provocan cambios en los pesos de la red neuronal, como se puede deducir de las ecs 1.22 y 1.23, que se traducen en un 100% del error predictivo producido, esto provoca una velocidad de adaptación elevada pero, con el tiempo (aprendizaje en línea), los pesos van siendo modificados en exceso. Por ello, Se ha seleccionado el valor 0.85 con el fin de conservar, desde el punto de vista de su operación en continuo, en mayor grado, la información adquirida en aprendizajes previos y que ésta presente una alta capacidad de adaptación a problemas nuevos.

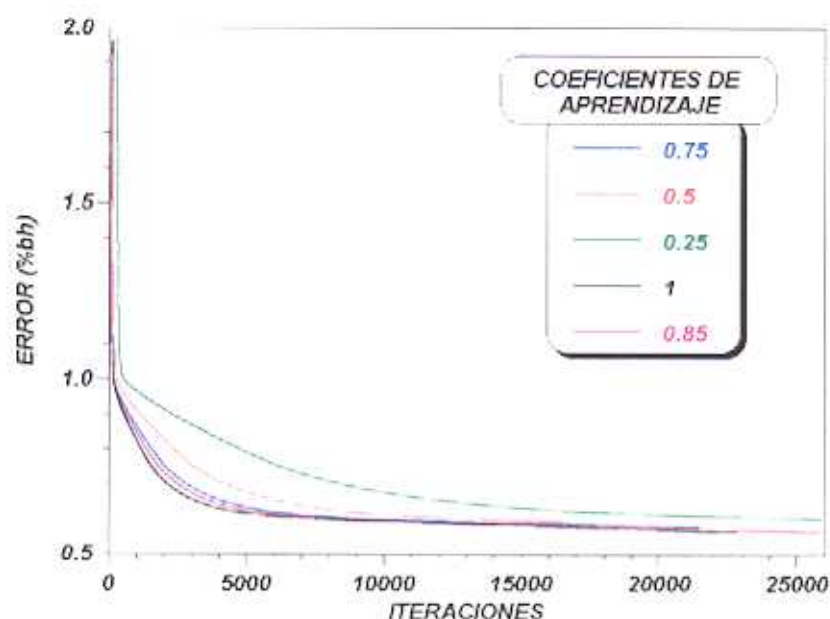


Figura 4.27.- Coeficientes de aprendizaje para la topología (3 nodos de entrada, 4 neuronas en la capa intermedia, 1 neurona de salida).

4.4.2.2.-Proceso de verificación del aprendizaje

El proceso operativo de una red neuronal artificial optimada en un proceso de modelización o cualquier proceso donde se requiera una predicción de semejantes características, consiste fundamentalmente en la introducción a la red neuronal de datos a tiempo t , de la humedad de salida, de la temperatura de entrada del aire y del lecho para que, a partir de éstos, la red prediga la humedad de salida del sólido en un instante de tiempo posterior o a tiempo $t+1$.

El proceso de aprendizaje realizado utilizando la topología (3,4,1) y el coeficiente de aprendizaje (0.85) optimados según el apartado anterior, se ha llevado a cabo con dos muestras experimentales de secado. En la Figura 4.28 se muestra el grado de adaptación que presenta las predicciones de dicha red neuronal optimada, utilizando el mismo fichero tanto para el adiestramiento como para el proceso de verificación del aprendizaje. Las condiciones experimentales con la que se ha obtenido dicho fichero están reflejadas en la tabla 4.5, experimento número 11. Como se puede ver en la Figura 4.28, la adaptación es adecuada, presentando un error acumulado, para todos los puntos del fichero de aprendizaje, ec 1.12 , inferior a $1 \cdot 10^{-3}$.



Para realizar una verificación adecuada del grado de adiestramiento de una red neuronal de estas características es necesario utilizar ficheros de datos que no hayan sido presentados a la red previamente; con este objetivo se han utilizado dos muestras de verificación obtenidas en experimentos de secado. En las Figura 4.29 y 4.30 (las condiciones experimentales de dichas curvas de secado están reflejadas en la tabla 4.5 para los experimentos 14 y 15 respectivamente) se muestran las predicciones de la red neuronal optimada (topología 3 nodos de entrada, 4 neuronas ocultas, 1 neurona de salida, $\mu=0.85$, pesos optimados mediante la muestra anteriormente mencionada) y el valor de humedad inicial real.

Cabe destacar que las mayores diferencias entre el valor predicho y el real tienen lugar cuando se produce un cambio de pendiente, manteniéndose una separación residual entre el valor predicho y el real con el tiempo, para tiempos superiores a 100 s, como se puede observar en la Figura 4.29, este efecto también se muestra en la Figura 4.30 para tiempos superiores a 40 s.

Si se realiza una comparación cualitativa de las Figuras 4.28 con las 4.29 y 4.30, es de destacar que el error de predicción es mayor en las últimas, esto es debido a que dichas predicciones se han realizado sin ningún tipo de aprendizaje intermedio. Teniendo en cuenta este aspecto, las diferencias entre el valor real y el predicho mostrado en las Figuras 4.29 y 4.30 es adecuado para posibles usos de dichas redes para fines de modelización del secado del orujo en el secadero fluidizado/móvil.

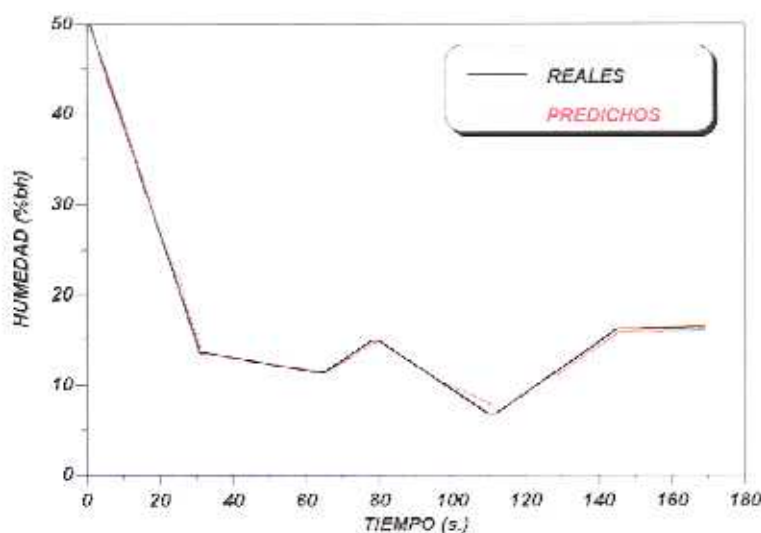


Figura 4.28.- Adaptación de las predicciones de la red neurona (3.4.1, $\mu=0.85$) a la muestras de secado utilizada en el proceso de aprendizaje.

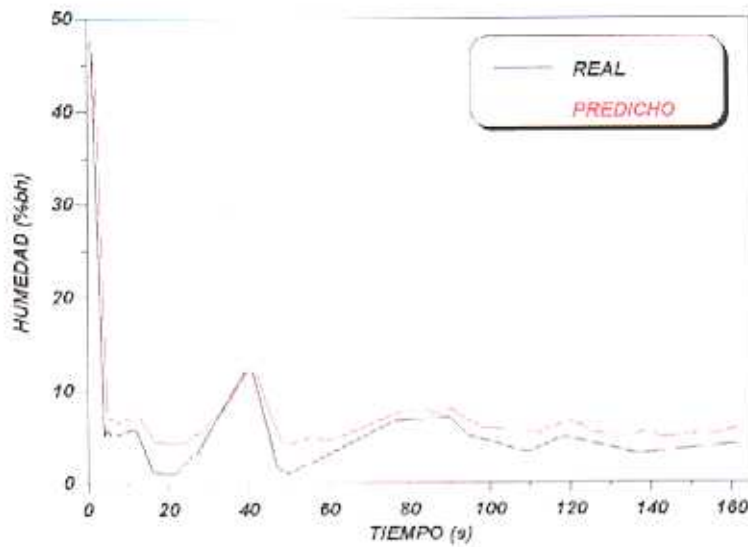


Figura 4.29.- Verificación de los pesos optimizados de la red neurona (3.4.1, $\mu=0.85$) con una muestra de secado no usada previamente.

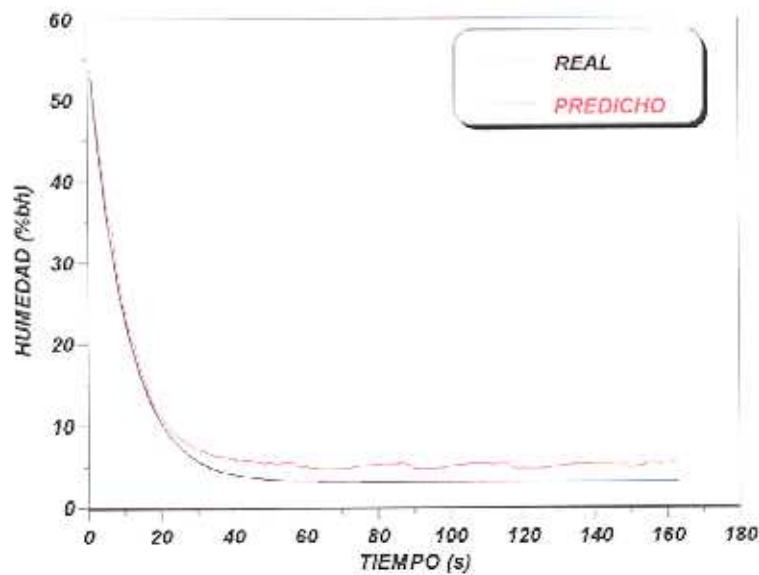


Figura 4.30.- Verificación de los pesos optimizados de la red neurona (3.4.1, $\mu=0.85$) con una muestra de secado no usada previamente.

En base a las Figuras 4.29 y 4.30, el error absoluto de predicción de la humedad de salida del sólido ($H_{real}-H_{predicha}$), en experimentos reales no utilizados previamente en el proceso de



aprendizaje de la red neuronal, es del orden de 0.01-0.05 % bh, por lo que es adecuado para procesos de modelización de procesos de secado en lecho fluidizado o para cualquier otro proceso donde se requieran predicciones, tales como sistemas de control adaptivos-predictivos o para sistemas de control basados en redes neuronales artificiales.

4.4.2.3.- Modelización del proceso de secado mediante redes neuronales

Mediante la red neuronal artificial de topología (3,4,1), la matriz de pesos y el coeficiente de aprendizaje optimados anteriormente, se ha realizado una modelización del proceso de secado como se expone a continuación:

1. La matriz de pesos se ha optimado con toda la información disponible, propia del secadero (experimentos de secado llevados a cabo dentro del secadero), mediante procesos de aprendizaje, semejantes a los expuestos, en serie.
2. Para la modelización es necesario introducir al programa de cálculo un estado inicial, es decir, se introduce al código un valor de temperatura de entrada del aire, del lecho y la humedad del sólido dentro del lecho a $t=0$.
3. La red neuronal predice un valor futuro de humedad ($t=k+1$).
4. El valor de humedad a $t=k+1$ predicho en el punto 3 y los valores de temperatura del gas y del lecho se alimentan de nuevo a la red, y se vuelve a predecir la humedad a $t=k+1$ (de forma absoluta, en la primera iteración, esta humedad correspondería a $t=2$).
5. Se vuelve al punto 3, hasta que se desee finalizar la modelización.

En las Figuras 4.31 y 4.32 (las condiciones experimentales de dichas curvas de secado están reflejadas en la tabla 4.5 por los experimentos 11 y 14 respectivamente) se muestra el ajuste de la humedad real y predicha mediante el proceso de modelización neuronal anteriormente explicado. La única diferencia entre las Figuras 4.31 y 4.32 son las condiciones experimentales de partida de cada experimento. Como se puede observar en la Figura 4.31, el error en cada punto es mayor que en la Figura 4.32.

En la Figura 4.32 se muestran dos perfiles, uno de humedad real y otro predicho por la modelización neuronal del secadero para las condiciones de trabajo mencionadas anteriormente,



como se puede observar, en comparación con la Figura 4.30, la predicción en este último caso es más precisa, esto es debido a que el perfil de humedad real que se muestra es más uniforme y por lo tanto de más fácil modelización, por otro lado la matriz de pesos utilizada, en este último caso es más completa que en el primer caso puesto que ha sido optimada con más experimentos de secado.

Las curvas de secado predichas por la red dan una información suficiente y adecuada para el diseño de secaderos. Para predecir curvas de secado mediante redes neuronales es sólo necesario datos de fácil obtención y medida en la operación de secado (temperaturas y humedades).

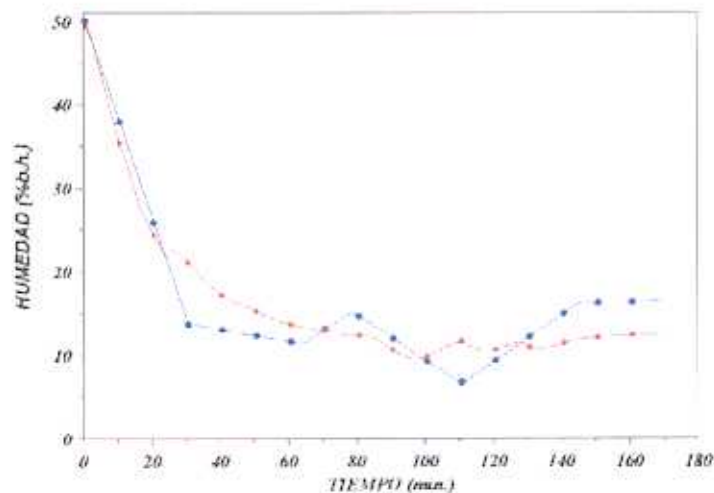


Figura 4.31.- Perfil de humedad (●)Humedad real del sólido; (■)Valores de Humedad del sólido en la modelización del secado.

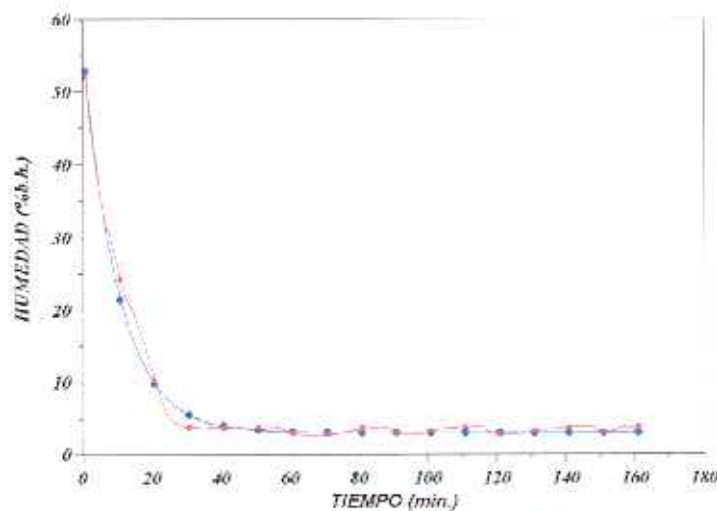


Figura 4.32.- Perfil de humedad (●)Humedad real del sólido; (■)Valores de Humedad del sólido en la modelización del secado.

5.- EXTENSIONES Y APLICACIONES AL DISEÑO INDUSTRIAL



5.- EXTENSIONES Y APLICACIONES AL DISEÑO INDUSTRIAL

Para una aplicación al diseño, es necesario realizar una serie de análisis y estudios paralelos relativos a aspectos que si bien no influyen directamente en la operación de secado desde el punto de vista técnico, indudablemente lo hacen desde un punto de vista económico. Estos aspectos complementan la validación del proceso de secado a nivel laboratorio y de su escalado a nivel planta piloto. Como aspectos relevantes, dentro de este apartado, se han tratado distintos puntos entre los que cabe destacar:

- Control del secadero para un funcionamiento adecuado de la operación de secado.
- Gasto energético de la operación global de secado y optimación del rendimiento energético.
- Calidad del aceite del orujo obtenido a partir del orujo seco mediante extracción con hexano, comparando ésta con la de aceites obtenidos a partir de un orujo seco, secado en un secadero rotatorio convencional.

5.1.- CONTROL DE LA OPERACIÓN DE SECADO

Se ha ensayado un sistema de control compuesto por tres lazos cerrados de control y un indicador de humedad del orujo a la salida, descritos en el apartado 2.3.6. Estos lazos son independientes y en su funcionamiento no requieren información de ningún otro. Se ha seleccionado un sistema de control de este tipo fruto del compromiso entre los factores económicos y de calidad del orujo seco producido desde el punto de vista de las utilidades posteriores (extracción de aceite de orujo, compostaje, etc).

El sistema de control del secadero propuesto se compone de tres lazos de control:

1. Control del caudal del fluido de entrada.
2. Control de la temperatura del aire de entrada.
3. Control de la alimentación de sólido al lecho.
4. Indicador de la humedad del orujo a la salida.



Control del caudal del aire de entrada: El caudal de aire de entrada esta controlado mediante un controlador de flujo másico, la acción de control que lleva asociado este controlador es de tipo Proporcional-Integral-Diferencial (PID), descrito en el apartado 2.3.6.

Cuando se comienza el experimento, como se ha comentado en apartados anteriores, se fija el caudal de entrada de aire que se desea mantener constante a lo largo de toda la operación de secado. Este lazo de control verifica todas las características fluidodinámicas relacionadas con el caudal de aire frío, tales como la calidad de fluidización, el transporte del sólido a través del secadero, etc.

Control de la temperatura del aire de entrada La temperatura del aire de entrada es controlada mediante un controlador basado en una acción de control PID. Como se ha comentado anteriormente, el caudal de aire proporcionado por el compresor a una presión de 4 kg/cm^2 es calentado convectivamente mediante una resistencia eléctrica a una temperatura inicial de entre 60 y 160 °C.

Al comienzo de cada experimento se establece la temperatura de entrada como punto de consigna. Por medio de una resistencia eléctrica, donde la acción de control es la intensidad eléctrica de la misma, se calienta el aire hasta alcanzar la temperatura adecuada. A lo largo del experimento dicha temperatura de entrada debe mantenerse constante en un intervalo estrecho, factor importante para el desarrollo de la operación de secado, puesto que éste es el aporte energético al equipo.

Control de la alimentación de sólido al lecho fluidizado: El control de la temperatura dentro del lecho fluidizado se lleva a cabo por medio de termopares tipo K, descritos anteriormente, distribuidos a lo largo del lecho fluidizado que miden la temperatura en el interior del mismo y un controlador cuya acción de control es todo-nada.

El control de la operación de secado se basa fundamentalmente en el control de la temperatura del lecho fluidizado. Cuando el orujo presecado en el lecho móvil es alimentado al lecho fluidizado la temperatura dentro del lecho desciende a valores semejantes a la temperatura de bulbo húmedo. Cuando la temperatura del lecho asciende a valores superiores al valor de la temperatura de consigna se activa tanto la alimentación de orujo presecado del lecho móvil al lecho fluidizado como la descarga de orujo seco del



lecho fluidizado. En el comienzo de la operación de secado se fija la temperatura de consigna en el interior del lecho fluidizado siendo éste un valor que depende del experimento, teniendo en cuenta los valores optimizados anteriormente sería de 125°C.

Indicador de humedad: Durante todo el proceso de secado es adecuado conocer la humedad del orujo seco a la salida de la instalación para poder comprobar y verificar en línea el funcionamiento del secadero. Por ello se ha dispuesto de un indicador que muestra la humedad del sólido a la salida del lecho fluidizado, apartado 2.3.6. Esta medida de la humedad no lleva implícita ninguna acción de control, aunque si complementa la información requerida de la operación de secado.

Dado que la operación de secado se lleva a cabo en modo continuo, el proceso de carga y descarga del sólido del secadero se desarrolla siempre por pulsos, realizando alimentaciones de sólido presecado y descarga de sólido seco teniendo en cuenta siempre que es necesario mantener dentro del lecho fluidizado sólido necesario para realizar la operación de secado adecuadamente.

La operación de secado está fundamentalmente controlada por medio de la temperatura del lecho. Como ya se ha tratado, el control se realiza a través de la temperatura del lecho fluidizado, verificándose posteriormente la humedad del orujo seco a la salida del secadero. Los otros dos lazos de control, correspondientes al control del caudal de aire y la temperatura de entrada del aire, complementan el control manteniendo las condiciones fluidodinámicas del sólido y el aporte energético de la operación de secado, respectivamente.

En la Figura 5.1, se muestra una curva de secado (●) y los porcentajes de acción de control para mantener el punto de consigna de temperatura del lecho fluidizado (▲) y del caudal del aire de entrada (■). Como se puede observar los primeros 30 minutos corresponden a una puesta en marcha del secadero.

Se ha realizado un experimento para comprobar la eficacia del sistema de control propuesto. La temperatura de consigna del aire de entrada del lecho fluidizado ha sido de 160°C y el valor de consigna para el lazo que controla el caudal del aire es de 4.5 L/s. Ambos valores conducen a una temperatura inicial del lecho (cuando no se ha alimentado orujo húmedo) de 125°C.

El desarrollo del experimento es como sigue: Se parte de un sólido lleno de sólido seco y se espera a la estabilidad del caudal y la temperatura del aire a la entrada. Alcanzado un estado



estacionario en el lecho fluidizado se alimenta sólido húmedo. El objetivo del experimento fue comprobar el funcionamiento de cada uno de los lazos de control, por ello transcurridos 32 minutos desde que se alimento sólido húmedo se genero una perturbación en el caudal del aire a la entrada, antes de la regulación del caudal del aire y en la temperatura del aire a la entrada del secadero. Estas perturbaciones son las únicas que se introducen desde el exterior del sistema y en el resto del experimento no se realiza ninguna otra manipulación externa de las variables del sistema.

A los 30 minutos se aumentó la intensidad eléctrica a través de la resistencia calefactora con el fin de aumentar el aporte energético sobre el aire que entra en el secadero. Por otro lado, se produjo una perturbación en la presión de la línea del aire comprimido, por lo que para acondicionar el caudal de aire de entrada al secadero acorde con el punto de consigna fue necesario una apertura mayor de la válvula del controlador de flujo másico con lo que se tuvo que acondicionar la temperatura del aire a la entrada del secadero para mantener las temperaturas de consigna especificadas inicialmente. En los últimos minutos se produjo un establecimiento de todas las variables de operación, con lo que se estabilizaron las distintas acciones de control, obteniendo de esta forma una humedad acorde con las especificaciones requeridas.

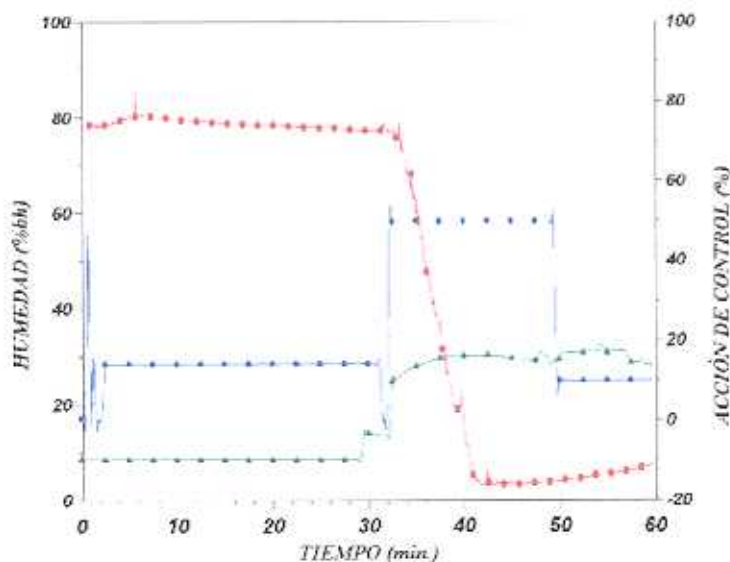


Figura 5.1.- Experimento de secado con control automático: (●) perfil de humedad; (■) Porcentaje de acción para el control del caudal de aire; (▲) Porcentaje de acción para el control de la temperatura de entrada del aire al lecho fluidizado.



El sensor de humedad indica la humedad del sólido a la salida del secadero. Debido al volumen del sensor ($3.47 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$) y a que debe estar completamente lleno de sólido para realizar una medida precisa, se produce un retraso de aproximadamente 30 minutos, con lo que dicho sensor de medida no es adecuado para realizar el control del secadero, por ello se ha utilizado únicamente como indicador de la humedad del sólido para realizar un control de la calidad del orujo seco.

No cabe duda que tanto el sistema de control puede ser mucho más sofisticado que el empleado (Adaptivos-Predictivos, etc), como las conexiones entre los lazos de control (Sistemas de control distribuido). Pero, como ya se ha mencionado en este apartado, el sistema de control utilizado en la operación de secado es económico y desde un punto de vista técnico muy básico y lo más importante, es adecuado desde el punto de vista del acondicionamiento del orujo con vistas a las utilidades posteriores.



5.2.- GASTO ENERGÉTICO DE LA OPERACIÓN GLOBAL DE SECADO

El gasto energético, dentro de la operación de secado, no se limita únicamente al secado en sí, sino que dicho consumo debe extenderse también al gasto por impulsión del fluido, sistemas de alimentación de orujo, etc.

5.2.1.- Gasto energético en el secadero

Para establecer unos límites de operación desde el punto de vista energético, se ha usado como base de referencia una auditoria realizada a distintos sistemas de secado en Andalucía por SODEAN (Sociedad para el Desarrollo Energético de Andalucía), donde se pone de manifiesto que el consumo en los secaderos de la industria extractora andaluza se encuentra comprendido entre 1.39 y 1.63 kW-h/Kg_{agua evaporada}

La energía empleada para el secado del orujo húmedo en un secadero basado en el concepto de lecho fluidizado/móvil, es empleada fundamentalmente en dos objetivos principales: La compresión del aire para alcanzar las condiciones adecuadas de contacto gas-sólido y el aporte energético al aire con el fin de calentar dicho fluido y que éste proporcione posteriormente energía térmica al sólido húmedo a secar.

El aporte de la energía necesaria para alcanzar las condiciones fluidodinámicas adecuadas del sólido se computa, mediante el cálculo de la potencia requerida para hacer circular el caudal necesario de fluido a través de todo el equipo de fluidización, es decir, los lechos y dispositivos complementarios. Al moverse el fluido a través de las diversas partes del equipo se producen una serie de caídas de presión en serie. Para que el fluido pueda circular a través de dichos elementos es necesario aportar la potencia adecuada para tal fin. Para ello se deben tener en cuenta las caídas de presión debido a: la presencia del lecho, los conductos de entrada (que van del compresor hasta el lecho), el distribuidor del lecho fluidizado (del tipo "sandwich"), los conductos de salida, el sistema de separación de polvos arrastrados (ciclones), etc.

Teniendo en cuenta las pérdidas de presión por la presencia del distribuidor ($\Delta P_{\text{distribuidor}}$), de los lechos fluidizado y móvil (ΔP_{lechos}) y la presencia del ciclón ($\Delta P_{\text{ciclón}}$), medidas que se han realizado experimentalmente, es necesario comprimir el gas de entrada a una presión P definida por:



$$P = P_l + \Delta P_{distribuidor} + \Delta P_{lechos} + \Delta P_{ciclón} \quad (5.1)$$

La presión P calculada oscila entre 1.1 y 1.5 kg/cm². El consumo de energía mecánica necesaria asciende a 0.05 kW-h/kg_{agua}. Dicho consumo es semejante a otros sistemas de secado tales como el secadero rotatorio (este es el caso del secadero de Oleícola El Tejar S.A.).

El aporte energético necesario para elevar la temperatura del aire y mantener dentro del lecho el intercambio energético entre el fluido caliente y el sólido húmedo se ha calculado a través del incremento térmico que se produce entre el aire a la entrada y a la salida del secadero. De esta forma, se puede determinar cuál ha sido el aporte energético íntegro del aire caliente al orujo húmedo, prescindiendo del mecanismo utilizado para dicho fin, teniendo, de esta forma, datos más realísticos y escalables. En la tabla 5.1 se muestran las condiciones de diferentes experimentos con el consumo energético que ha tenido lugar en cada uno de ellos. El consumo se ha expresado por kg de agua eliminada del sólido, ya que éste es el parámetro objetivo dentro de una operación de secado. Se debe tener en cuenta que el consumo mínimo termodinámico es 0.625 kW-h/kg_{agua} (consumo energético empleado exclusivamente en evaporar un kg. de agua).

La temperatura de salida del aire del secadero es de 20°C y el caudal de aire empleado en la totalidad de los experimentos es de 4.1 L/s, la humedad final es la correspondiente a la humedad de equilibrio, para las condiciones del ambiente (4-8% b.h.).

Tabla 5.1.- Condiciones de operación y sus respectivos consumos energéticos

T _{ENTRADA} (°C)	T _{LECHO} (°C)	H _{INICIAL} (%b.h.)	Q _{AGUA} (kg/h)	P. Mezcla (%)	Consumo (kW-h/kg _{agua})
165	125	50	0.98	74	0.714
155	125	50	0.96	74	0.803
155	125	46	0.88	69	0.871
145	125	51	0.84	76	0.844
155	125	47	0.7	70	1.106
155	120	47	0.49	70	1.58
155	120	50	0.4	74	1.934
155	120	22	0.23	PRESECADO	3.34



El consumo es función del agua eliminada en el proceso. Como se puede observar en la tabla 5.1, el consumo menor corresponde a 0.714 kW-h/kg_{agua}. En este experimento el sólido tratado tenía una humedad elevada (alto contenido en agua) y por otro lado el caudal de agua eliminada en este experimento fue de 0.98 kg/h. En la última fila, el experimento que muestra un mayor consumo (3.34 kW-h/kg_{agua}), es el secado de un sólido presecado previamente. Dicho consumo es tan elevado debido fundamentalmente al bajo caudal de agua eliminada en dicho proceso. Se debe tener en cuenta que a todos los consumos mostrados en la tabla 5.1 se les debe sumar el consumo necesario para alcanzar las condiciones fluidodinámicas adecuadas para el sólido (0.05 kW-h/kg_{agua}).

Como se puede observar en la tabla 5.1, el porcentaje de mezcla esta dentro del intervalo óptimo (70-80%) optimado en el apartado 3.3, aunque la manejabilidad de dicho sólido, como ya se ha mencionado anteriormente, depende de otros factores íntimamente relacionados con la humedad de los componentes de la mezcla.

5.2.2.- Capacidad de evaporación del secadero

La capacidad de evaporación de un secadero es una de las variables que junto con el consumo y el tipo de intercambio energético, caracterizan al equipo donde se ha de tratar el sólido. Este parámetro se define como el número de kg de agua que es capaz de evacuar el secadero por unidad de tiempo y m³ de volumen de secadero utilizado. De igual forma, dicho parámetro es utilizado para cuantificar el rendimiento energético y la producción de sólido seco, de los secaderos a escala industrial.

En la tabla 5.2 se muestran distintas capacidades de evaporación para experimentos llevados a cabo con las condiciones de operación ya fijadas anteriormente.

La capacidad de evaporación disminuye fundamentalmente debido a la disminución del agua eliminada. Como se puede observar en la tabla 5.2, aquel que presenta una mayor capacidad de evaporación coincide con un menor consumo, esto es debido al adecuado contacto sólido-gas que ha tenido lugar dentro del secadero. Por otro lado, el secado que se ha llevado a cabo con un sólido presecado en otro equipo, presenta una capacidad de evaporación muy baja.



Tabla 5.2.- Capacidades de evaporación y consumos energéticos

TLECHO (°C)	HINICIAL (%b.h.)	G. Mezcla (%)	C.Evaporación (kg _{agua} /(h·m ³))	Consumo (kW-h/kg _{agua})
125	50	74	109.2	0.714
125	50	74	82.16	0.803
125	46	69	75.76	0.871
125	51	76	72.73	0.844
125	47	70	59.74	1.106
120	47	70	41.81	1.58
120	50	74	34.15	1.934
120	22	PRESECADO	19.75	3.34



5.3.- CALIDAD DEL ORUJO TRATADO

El orujo, como se ha comentado anteriormente, es un subproducto propio del proceso productivo del aceite de oliva. Para que el orujo seco presente estas utilidades y que el proceso industrial sea económico y técnicamente adecuado además de que el producto generado cumpla con las especificaciones requeridas, es necesario que la calidad del orujo tanto el seco como el fresco sean adecuadas. Dado el objetivo de la presente investigación, se ha tratado fundamentalmente la calidad del orujo seco secado en el secadero basado en el concepto fluidizado/móvil, sin olvidar la calidad del orujo fresco.

El orujo fresco presenta una tendencia muy marcada de degradación espontánea mediante reacciones de fermentación, dada su composición química. Dentro de su analítica, el compuesto que acelera dicho proceso de degradación es fundamentalmente el agua, y la condición que acelera dicha reacción es fundamentalmente la temperatura, tanto la de almacenamiento como la de secado.

La operación de secado que se desarrolla en el secadero fluidizado/móvil se lleva a cabo a bajas temperaturas, en comparación con las condiciones de operación que se desarrollan en otros tipos de secaderos tales como los rotatorios donde la temperatura siempre es mayor de 300°C. En el secadero objeto de análisis, la temperatura óptima de operación, como ya se ha comentado anteriormente, es de 125°C. Dicha temperatura genera un consumo energético bajo y además proporciona un orujo con unas cualidades adecuadas para la extracción del aceite de orujo.

Según informes de análisis realizados por la empresa Oleícola El Tejar S.A., del orujo secado en el secadero objeto de la presente investigación, se desprende que el aceite de orujo extraído con hexano, resulta de calidad similar o incluso superior al que se obtiene en las extractoras actualmente en funcionamiento, tablas 5.3, 5.4 y 5.5. Al haber sido secado a baja temperatura desaparece el riesgo de que el aceite sufra un calentamiento que deteriore su composición físico-química. Dicha información ha sido obtenida mediante el análisis y estudio de diferentes parámetros que definen reglamentariamente y según la Normativa Comunitaria la calidad del aceite de orujo.

En las tablas 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran diversas analíticas realizadas a las muestras secas. En la tabla 5.3 se muestra el incremento de humedad desde valores propios del orujo fresco hasta sus correspondientes humedades de equilibrio para las condiciones de secado utilizadas (optimadas



previamente). En cualquier tipo de secado se produce un incremento de la acidez del aceite extractado, esto es una consecuencia directa del tratamiento, tanto de extracción química como de secado. De los datos de acidez y contenido graso se desprende que el aceite de orujo producido a través del orujo fresco es, como se ha comentado anteriormente, de una calidad suficientemente adecuada como para producir dicho producto a través del sistema de secado descrito.

Tabla 5.3.- Analítica de un orujo seco secado en fluidizado/móvil

<i>Muestra</i>	<i>Humedad inicial</i>	<i>Humedad final</i>	<i>C. Graso inicial</i>	<i>C. Graso final</i>	<i>Acidez inicial</i>	<i>Acidez final</i>
1	69.21	5.95	3.26	7.85	4.90	12.10
2	71.20	4.55	3.10	7.95	3.80	12.58
3	70.37	5.30	3.20	7.85	4.30	12.10
4	69.50	6.85	3.15	7.90	3.90	12.03
5	70.40	5.70	2.70	7.60	5.09	12.40

En la tabla 5.4 se muestra la composición en cuanto ácidos grasos y trilinoleína de un aceite de orujo extractado a partir de un orujo seco. Es destacable la cantidad de ácido oleico y linoleico presente en el aceite de orujo extractado del sólido secado en el secadero objeto de la presente investigación, que confiere a dicho aceite de unas características similares a las del aceite de oliva

En la tabla 5.5 se muestra los valores límites permitidos en cuanto al contenido de ácidos en aceites de oliva virgen, oliva refinado, y de orujo de oliva refinado.

Si se comparan los datos mostrados en las tablas 5.4 y 5.5, salvo el valor de la acidez, la analítica del aceite de orujo de oliva extractado y sin refinar que se muestra en la tabla 5.4 responde, casi en su totalidad, a un aceite de oliva refinado en lo que corresponde al contenido en ácidos grasos. Comparando la analítica mostrada en la tabla 5.4 con los valores de los ácidos grasos límites del aceite de orujo de oliva mostrado en la tabla 5.5, los valores que no se ajustan son la acidez y el contenido en ácido Linolénico.

Los esteroides son alcoholes naturales que constituyen la mayor parte insaponificable del aceite. El mayor contenido es el β -sitosterol que se encuentran en todos los aceites vegetales. La presencia de este compuesto en los aceites de oliva y de orujo debe superar el 93% y el campesterol debe ser inferior al 4%, además si se encuentra colesterol su contenido no debe superar el 0.5% de la fracción de esteroides. En los aceites vegetales la identificación y dosificación de esteroides se



utiliza para el reconocimiento de los mismos así como para detectar el adulteración de los aceites vegetales con grasas animales.

Tabla 5.4.- Análítica de los ácidos grasos y Trilinoleina de un Aceite de Orujo de Oliva

<i>Muestra n°</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Acidez</i>	14.9	13.8	14.3	13.9	15.09
<i>Ac. Palmítico</i>	10.66	9.16	9.90	9.87	10.30
<i>Ac. Palmítoleico</i>	0.57	0.65	0.53	0.68	0.62
<i>Ac. Estearico</i>	3.04	3.15	3.10	3.25	3.32
<i>Ac. Oleico</i>	74.40	76.08	75.50	75.40	74.90
<i>Ac. Linoleico</i>	10.07	10.17	10.13	9.90	10.09
<i>Ac. Linolenico</i>	0.78	0.77	0.76	0.75	0.72
<i>Trilinoleina</i>	0.65	0.63	0.57	0.59	0.60

Tabla 5.5.- Valores límites de ácidos grasos en algunos aceites vegetales.

<i>Muestra n°</i>	<i>Aceite de oliva virgen</i>	<i>Aceite de oliva refinado</i>	<i>Aceite de orujo de oliva refinado</i>
<i>Acidez</i>	2	0.5	0.5
<i>Ac. Palmítico</i>	7	16	14
<i>Ac. Palmítoleico</i>	0.3	2.8	2
<i>Ac. Estearico</i>	1	4.9	4.9
<i>Ac. Oleico</i>	61.3	82.4	80.0
<i>Ac. Linoleico</i>	2.3	-	6.0
<i>Ac. Linolenico</i>	≤1.4	0.9	

En la siguiente tabla 5.6 se muestra la composición esterólica de distintos aceites de orujo extractados de muestras de orujo secadas en el secadero fluidizado/móvil, como es característico de dicho aceite, éste contiene eritrodíol y uvaol aunque la cantidad de dichos compuestos es reducida, comparando esto con otros aceites de orujo producidos industrialmente.

En las tablas 5.7 y 5.8 se muestran los valores límites de la fracción esterólica, en la totalidad de los aceites de oliva es decir en los aceites de oliva y de orujo de oliva.

Desde el punto de vista de la fracción esterólica, el aceite extraído del orujo fresco secado en el secadero fluidizado/móvil se puede considerar como un aceite de oliva. Aunque la presencia del eritrodíol y uvaol indica que dicho aceite es un aceite de orujo de oliva.



Comparando las tablas 5.6 y 5.7 y teniendo en cuenta que se trata de un aceite de orujo y de oliva respectivamente, cabe destacar que aunque los parámetros característicos de un aceite de orujo como es el uvaol y el eritrodiol se encuentran presentes en el aceite de orujo de oliva extraído del orujo secado en el secadero fluidizado/móvil, el contenido en otros compuestos, de este aceite, es muy semejante como es el caso del β -sitosterol, estigmasterol, etc.

Tabla 5.6.- Analítica de la fracción esterólica del Aceite de Orujo.

Muestra n ^o	1	2	3	4	5
<i>Campesterol</i>	3.90	3.87	3.85	3.92	3.88
<i>Estigmasterol</i>	2.25	1.97	2.12	1.85	1.90
<i>β-Sitosterol</i>	94.50	93.90	94.02	93.80	94.20
<i>Δ7-Estigmasterol</i>	0.48	0.44	0.45	0.47	0.47
<i>Esteroles Totales (ppm)</i>	2826	2754	2550	2780	2860
<i>Eritrodiol + uvaol</i>	6.3	7.8	6.9	7.3	6.8

Tabla 5.7.- Analítica de los valores límites de la fracción esterólica del Aceite de Oliva.

	Oliva virgen extra	Oliva virgen	Oliva virgen corriente	Oliva virgen lampante	Oliva refinado	Oliva
<i>Colesterol</i>	Máx 0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<i>Brassicasterol</i>	Máx 0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
<i>Campesterol</i>	Máx 0.4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
<i>Estigmasterol</i>	< Camp.	< Camp.	< Camp.	-	< Camp.	< Camp.
<i>β-Sitosterol</i>	Mín 93	93	93	93	93	93
<i>Δ7-Estigmasterol</i>	Máx 0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<i>Esteroles Totales</i>	Mín 1000	1000	1000	1000	1000	1000

Tabla 5.8.- Analítica de los valores límites de la fracción esterólica del aceite de orujo de oliva.

	Crudo	Refinado	Orujo de Oliva
<i>Colesterol</i>	Máx 0.5	0.5	0.5
<i>Brassicasterol</i>	Máx 0.2	0.2	0.2
<i>Campesterol</i>	Máx 0.4	4	4.0
<i>Estigmasterol</i>	-	< Camp.	< Camp.
<i>β-Sitosterol</i>	Mín 93	93	93
<i>Δ7-Estigmasterol</i>	Máx 0.5	0.5	0.5
<i>Esteroles Totales</i>	Mín 2500	1800	1800

Analizando cualitativamente la analítica que se ha mostrado en este apartado, teniendo en cuenta la procedencia del aceite de orujo de oliva (extractado a partir de un sólido fresco secado en



el secadero fluidizado/móvil), muestran una calidad adecuada del aceite del orujo de oliva extractado. El parámetro discordante es la acidez, siendo éste un parámetro que se puede ajustar mediante el obligado proceso refinado posterior.

6.- CONCLUSIONES



6.- CONCLUSIONES

El proceso de secado del orujo fresco con un rendimiento energético adecuado para aumentar la rentabilidad de dicha operación es un proceso transcendental dentro del sector oleícola, por ello es necesario un sistema de secado adecuado desde el punto de vista técnico, económico y de calidad de los productos que puedan derivarse del producto seco.

A lo largo de la memoria se han expuesto implícitamente una serie de conclusiones que en este apartado se expondrán más detalladamente:

1. El orujo que se obtiene de la extracción del aceite de oliva por el método de dos fases se comporta como un fluido no newtoniano. Su ángulo de fractura varía con la humedad del orujo. Los valores típicos son de 90° para el orujo fresco y húmedo de alta humedad (60%) y de 50° para orujos semisecos con humedad del 30% y de 45° para orujos secos de humedad inferior al 10-12%.
2. Las características señaladas en la conclusión anterior hacen que para que el sólido pueda ser tratado en lecho fluidizado, el orujo fresco deba ser mezclado con orujo seco. La humedad de la mezcla como máximo debe ser del 55%. El proceso de mezclado de orujo fresco con orujo seco mejora notablemente el contacto sólido-gas. Por otro lado, es necesaria la optimización del porcentaje de mezcla, para que de esta forma se utilice la energía térmica suministrada al sólido más eficientemente de forma que el mayor porcentaje de dicha energía sea utilizada en el objetivo que se persigue, que es el secado de un sólido húmedo. Se ha obtenido que el porcentaje de mezcla es óptimo para valores del 70-80%. El porcentaje debe ajustarse hasta obtener un sólido húmedo con el 50-55% de humedad, que tenga las adecuadas propiedades fluidodinámicas, ángulos de fractura y tamaños de partícula.
3. El orujo presenta una distribución de tamaños de partícula con tres fracciones de tamaños característicos, una de 0.5 a 0.7 mm procedente de la pulpa fina de la aceituna, otra de 1-1.5 mm procedente de la pulpa de tamaño medio y otra de 3 a 4 mm procedente del hueso triturado. Los valores de las velocidades de mínima fluidización y de arrastre de las distintas fracciones del sólido permiten su tratamiento en lecho fluidizado. La velocidad de mínima fluidización es, para todos los orujos estudiados, de



- 0.012-0.75 m/s. La velocidad superficial de fluidización de trabajo más adecuada está entre 1.4 y 1.5 m/s.
4. Se ha determinado la humedad de equilibrio del orujo fresco bajo condiciones de atmósferas de aire con humedad relativa entre el 11 y 100%. La humedad de equilibrio para humedades relativas del aire entre el 30 y 45% se encuentran comprendidas entre el 4 y 8%.
 5. La humedad crítica del orujo fresco no se puede determinar en condiciones de fluidización, ya que dicho orujo, por su elevada proporción de agua, no puede ser fluidizado.
 6. El modo de operación afecta de forma importante a la velocidad del proceso de secado. La velocidad de secado al ambiente en bandejas oscila entre 0.33 y 1.25 h⁻¹. Mientras que en un lecho fijo oscila entre 10 y 34 h⁻¹ (temperaturas de operación ambiental y 60 °C respectivamente), en lecho fluidizado se encuentra comprendido entre 64 y 128 h⁻¹ (temperaturas de operación 75 y 125°C respectivamente). Estas diferencias se deben al grado de contacto sólido-aire. Cuando el secado se realiza en lecho fluidizado el sólido se encuentra particularizado y el contacto solido-aire es satisfactorio.
 7. Se ha determinado la cinética de secado en lecho fluidizado para un orujo húmedo, y un grado de mezcla del 70% para diferentes temperaturas comprendidas entre 75 y 125°C. Se ha determinado tres períodos de secado fundamentales que son el período de inducción, de velocidad constante y de velocidad decreciente. En cada uno de estos existe una clara dependencia de la velocidad de secado con el caudal másico de aire, humedad del orujo, humedad relativa del aire y temperatura de operación.
 8. Se ha realizado una modelización con redes neuronales artificiales, encontrándose que con una red neuronal del tipo perceptron multicapa con una topología relativamente sencilla (3, 4, 1) y un coeficiente de aprendizaje elevado (0.85) realiza una adecuada modelización con un breve proceso previo de aprendizaje (7000 iteraciones).
 9. Las variables que afectan a la velocidad de secado son: humedad del orujo alimentado, caudal y temperatura del aire. La humedad inicial del orujo alimentado esta fijada por la manejabilidad del sólido. El caudal de aire esta fijada por las velocidades de completa



- fluidización y de arrastre que presentan las partículas de diferente tamaño que presenta el orujo fresco. La temperatura se puede variar dentro de un intervalo mayor.
10. La calidad del orujo seco, como era de esperar, depende entre otros factores, de las condiciones de operación dentro de la etapa de secado. Se produce un deterioro del aceite de orujo extraído en relación directa con la temperatura de operación utilizada. A temperaturas dentro del lecho elevadas (mayores de 120°C), se produce un aceite de orujo con una acidez del orden del 31%.
 11. El aumento de la sección en la parte superior del secadero de lecho fluidizado, permite convertir la zona superior en un lecho móvil. La utilización de este sistema de secadero fluidizado/móvil presenta diferentes ventajas que se comentan en conclusiones posteriores.
 12. Las partículas de pequeño diámetro que son arrastradas desde el lecho fluidizado quedan retenidas dentro del propio secadero. Por ello en el secadero fluidizado/móvil no es necesario un sistema de separación de las partículas de pequeño diámetro por ello se requiere un menor espacio a la hora del diseño de un secadero a mayor escala.
 13. El lecho móvil sirve al secadero como un sistema que acondiciona el sólido húmedo presecándolo para su posterior secado global. Se ha analizado el perfil de humedades que presenta el lecho móvil del secadero fluidizado/móvil, apreciándose que el mayor porcentaje de secado tiene lugar en la parte tronco-cónica donde disminuye en aproximadamente el 31%. Por el contrario, en la parte cilíndrica de dicho lecho móvil sólo se disminuye la humedad en el 1%.
 14. El lecho móvil sirve como recipiente de alimentación de sólido presecado al lecho fluidizado. El orujo se puede alimentar al lecho móvil por medio de la gravedad. El orujo húmedo secado en el lecho móvil es alimentado al lecho fluidizado por medio de pulsos de aire a presión en la base del lecho móvil. Estos disparos aumentan la porosidad del sólido facilitando la alimentación del mismo al lecho fluidizado.
 15. El orujo seco se puede extraer de la zona fluidizada del secadero mediante una válvula J. Dicha válvula dosifica adecuadamente el orujo ya secado por medio de pulsos de aire a presión.



16. Las condiciones de operación térmicas más adecuadas para el secado de orujo en el secadero fluidizado/móvil es de 140-160°C en el aire de entrada y de 115-125°C en el lecho. El caudal de aire empleado es de 4.1 L/s.
17. El control del secadero mediante lazos independientes de control ofrece una alternativa sencilla y barata para el control del proceso de secado. Utilizando la temperatura del lecho fluidizado, como la variable controlada que activa la alimentación de orujo presecado del lecho móvil al fluidizado. Tanto el caudal del aire alimentado como la temperatura del aire a la entrada se controlan con dos lazos independientes.
18. El secadero fluidizado/móvil tiene un gasto energético medio de 1.2 kW-h/kg_{agua evaporada}. La capacidad de evaporación media del secadero es de 62 kg_{agua evaporada}/(h·m³). Gasto energético relativamente bajo, teniendo en cuenta que el consumo mínimo termodinámico es de 0.625 kW-h/kg_{agua evaporada} además de los 0.05 kW-h/kg_{agua evaporada} necesarios para alcanzar las condiciones de fluidización adecuadas. Industrialmente, los consumos reales se encuentran comprendidos entre 1.39 y 1.63 kW-h/kg_{agua evaporada}.
19. La temperatura óptima de operación del secadero fluidizado/móvil es considerablemente inferior a la utilizada en los secaderos industriales actuales. Por lo que la calidad del aceite extractado a partir del orujo seco muestra una calidad adecuada. El único parámetro discordante es la acidez, que se puede corregir fácilmente mediante refinado posterior

7.- NOMENCLATURA



7.- NOMENCLATURA

A	Area superficial (m^2)
A_0	Sección de lecho (m^2)
A_b	Función de Activación
C_p	Calor específico ($J/(kg \cdot ^\circ C)$)
D	Diámetro del cilindro (m)
d	Valor deseado dentro de la muestra de aprendizaje
dp	Diámetro de partícula (mm)
dp_n	Luz del tamiz n (mm)
E	Error de predicción
f_{os}	Período de oscilación del sensor de humedad
G	Velocidad Másica del fluido ($kg/(h \cdot m^2)$)
H	Humedad del Sólido (%bh)
H_f	Altura del lecho fluidizado (m)
H_i	Humedad en la interfase del sólido (%bh)
H_{mf}	Altura del lecho en mínima fluidización (m)
k	Conductividad térmica ($kJ/(h \cdot m \cdot ^\circ C)$)
L	Espesor de la capa interfacial (m)
L_0	Altura de lecho (m)
L_f	Altura del lecho en estado fluidizado (m)
L_{fijo}	Altura del lecho fijo (m)
L_x	Altura del lecho en un estado cualquiera (m)



M	Peso molecular del aire (g/mol)
N_0	Número de neuronas de entrada
P_0	Presión absoluta en el orificio (mm Hg)
q	Calor total transferido del gas al sólido (J/h)
Q	Calor intercambiado (J/kg)
q_0	Caudal de fluido (cm^3/s)
S	Peso de sólido seco (kg)
t	Tiempo
T_i	Temperatura de la interfase ($^{\circ}\text{C}$)
t_m	Tiempo medio de residencia del sólido
u_0	Velocidad superficial del fluido (m/s)
U_{kb}	Función de transferencia
u_{mf}	Velocidad superficial de mínima fluidización (m/s)
U_R	Velocidad reducida de trabajo
V_H	Volumen de huecos (L)
V_L	Volumen de lecho (L)
W	Velocidad de secado ($\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$)
W_{ab}	Peso de unión entre capas
W_i	Porcentaje en peso del sólido retenido en el tamiz
X	Humedad del sólido (% bh)
X^*	Humedad de equilibrio (%bh)
X_c	Humedad crítica (%bh)
y	Valor predicho por la red



SÍMBOLOS GRIEGOS

ε	Porosidad
ε_f	Porosidad del lecho fluidizado
ε_x	Porosidad en un estado cualquiera x
τ	Tiempo necesario para la completa transformación
$\mu(k)$	Coefficiente de aprendizaje variable
μ_0	Coefficiente de aprendizaje máximo calculado
μ_{max}	Coefficiente de aprendizaje máximo
Ω_n	Error dentro del algoritmo de propagación
ΔP	Pérdida de carga (kg/cm ²)
ΔP_0	Pérdida de carga en el orificio (c.c.a.)
ΔP_f	Pérdida de carga en un lecho fluidizado (c.c.a.)
ΔP_{fijo}	Pérdida de carga en un lecho fijo (c.c.a.)
ρ_s	Densidad del Sólido (kg/L)
Δt	Incremento de tiempo
λ_w	Calor latente de vaporización del líquido (kJ/kg)
ΔW_{ab}	Modificación del peso de unión entre la neurona a y la b

8.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



8.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alba, J.; “Nuevas tecnologías para la obtención del aceite de oliva”, *Fruticultura Profesional (Suplemento)*, 62:85-95, **1994a**.
- Alba, J.; “El orujo de aceituna, evolución, estado actual y perspectivas”, *Agricultura*, 2 40-59, **1994b**.
- Alba, J.; Ruiz, M.; Hidalgo, F.; Martínez, F.; Moyano, M.; “Procesos de elaboración: Nuevas técnicas de extracción”, *Dossier Oleo*, 2, 40-59, **1993**.
- Alba, J.; Ruiz, M.; Hidalgo, F.; “Control de elaboración y características analíticas de los productos obtenidos de la línea continua ecológica”, *Dossier Oleo*, 2, 43 XII Mostra mercato di olio nuovo. Impruneta (Italia), **1992**.
- Alba, J.; Ruiz, M.; Hidalgo, F.; “Control de elaboración y características analíticas de los productos obtenidos en una línea continua ecológica”, *Dossier Oleo*, 2 43-48, XII Mostra mercato di olio nuovo. Impruneta (Italia), **1992**.
- Alba, J.; “Nuevas Tecnologías para la obtención de aceite de oliva”, *Obtención y calidad de aceite*, **1991**.
- Amirante, P.; Di Renzo, G.; Digiovacchino, L.; Bianchi, B.; Catalano, P.; “Evolución tecnológica de las instalaciones de extracción de aceite de oliva” *Olivae*, 48-43, **1993**.
- Aragón, J.; “Tratamientos del alpeorujo para mejorar su aprovechamiento, Proyecto Improlive”; *Alimentación Equipos y tecnología*; Abril **1999**.
- Aragón, J; Palancar, M.; Serrano, M.; Torrecilla, J.; "Design and fluid-dynamic behaviour of J-valves systems for feeding and discharging solids in fluidized beds"; 13th International Congress of Chemical and process Engineering, Praha, Czech Republic Scientific Committee, (CHISA'98), **1998**.
- Aragón, J.; “Efectos producidos por las pantallas internas en el tipo de flujo de gas en lechos fluidizados”; Tesis Doctoral; Universidad Complutense de Madrid, **1976**.
- Aznar, M.; “Efecto de la velocidad lineal del gas y de las dimensiones del contactor en los parámetros del flujo de sólido en un lecho fluidizado/móvil continuo”; Trabajo de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, **1979**.
- Bhat, N.; McAvoy, T.; “Determining Model Structure for Neural Models by Network Stripping”; *Computers Chem. Engng.* 16 (4), 271-281, **1992**.
- Bhat, N.; McAvoy, T.; “Use of Neural Nets for Dynamic Modelling and Control of Chemical Process Systems”; *Computers Chem. Engng.* 14 (4/5), 573-583, **1990**.



- Bueno, J.; Iglesias, O.; “Cinética del secado térmico convencional”; Ingeniería Química, 433-442, Septiembre 1996.
- Bueno, J.; Iglesias, O.; García, A.; “Equilibrio de secado (II). Diagrama de equilibrio ternario”; Ingeniería química, Junio 1994.
- Bueno, J.; Iglesias, O.; “El secado. El secado como operación básica”; Ingeniería química, 433-442, Enero 1993.
- Cantos, E.; Muñoz, C.; Hermida, J.; “Transferencia de calor en la operación de batido de la aceituna. Ecuaciones básicas adimensionales”; Grasas y aceites, Vol. 34 Fasc. 4, 260-264, 1983.
- Cívantos, L.; “Evolución de la superficie olivarera y de las producciones de aceite de oliva en España”; Olivae, 59, 18-21, 1995.
- Clemente, G.; Bon, J.; Sanjuan, N.; Benedito, J.; “ La contracción durante el secado de los alimentos”; Alimentación, Equipos y Tecnología, Enero-Febrero 1999.
- Cybenko, G.; “Continuous valued neural network with two hidden layer are sufficient”, Report, Department of Computer Science, Tufts University, Medford, 1988.
- Diario Oficial de la Comunidad Económica Europea del 5 de septiembre 1991, reglamento n° 2568/91/CEE, 11 julio 1991.
- Donsí, G.; Ferrari, G.; “Modelling of Two-Component Fluid Bed Driers: an Approach to the Evaluation of the Drying Time”; Drying'92, 493-502, Editor A. S. Mujumdar, Elsevier Sci. Pub. B. V., 1992.
- Ergun, S.; “Fluid flow through packed columns”; Chem. Eng. Prog.; 48(2), 89, 1952.
- Escardino, A.; Ros, L.; “Desecación de arroz precocido. Determinación de humedades de equilibrio”; Rev. Agroquím. Tecnol. Aliment., 3/1, 27-33, 1963.
- Espinola, F.; “Cambios tecnológicos en la extracción del aceite de oliva virgen”; Alimentación, Equipos y tecnología, Abril 1996.
- Esterbauer, H.; “Role of antioxidants in preventing the oxidation of LDL, in the molecular mechanisms of aging: The role of dietary lipids”; 1st Medical Scientific Meeting. Lucca. 1988.
- Foust, A.; Wenzel, L.; Clumb, C.; Maus, L.; Andersen, L.; “Principles of unit operations”; Wiley International Edition, 1968.
- Frey, H.; “Tambores de secado para pulpa de difusión, las bandejas en cruz como entramado interior”; Ingeniería Química, Noviembre 1998.



- Frias, L.; García, A.; Hermoso, M.; Jiménez, A.; Llaverro, M.; Morales, J.; Ruano, M.; Uceda, M.; “Analistas de Laboratorio de Almazara”; Dirección General de Investigación y Extensión Agrarias, 1991.
- Friedman, S.; Marshall, W.; Chem. Eng. Progress, 45, 482-93, 572-88, 1949.
- García-Ortiz, A.; Frias, L.; “El alpechín y los orujos húmedos”; Agricultura, 815-819, 1994.
- Gutierrez, F.; “Secado y enfriado de productos por técnica de lecho fluido”; Alimentación, Equipos y tecnología, Enero-Febrero 1999.
- Hermoso, M.; González, J.; Uceda, M.; García-Ortiz, A.; Morales, J.; Frias, L.; Fernández, A.; “Elaboración de aceite de oliva de calidad II, Obtención por el sistema de dos fases”; JUNTA DE ANDALUCIA, Consejería de Agricultura y Pesca, 1995.
- Hermoso, M.; “Extracción de aceite de oliva mediante sistemas continuos de dos fases, consideraciones obtenidas en las campañas de España 1992/93”; Agricultura, 394-399, 1993.
- Hermoso, M.; Uceda, M.; García-Ortiz, A.; Morales, J.; Frias, L.; Fernández, A.; “Elaboración de aceite de oliva de calidad”; Dirección General de Investigación y Extensión Agrarias, 1991.
- Hilera, J.; Martínez, V.; “Redes neuronales artificiales fundamentos, modelos y aplicaciones”; Editorial Rama, 1995.
- Hoebink, J.; Rietema, K.; “Drying Granular Solids in Fluidized Bed-I: Description on Basis of Mass and Heat Transfer Coefficients”; Chem. Engng. Sci 35, 2135-2140, 1980.
- Hosking, J.; Himmelblau, D.; “Artificial Neural Network Models of Knowledge Representation in Chemical Engineering”; Computers chem. Engng. 12 (9/10), 881-890, 1988.
- Huang, B.; Mujumdar A.; “Use of Neural Network to predict industrial dryer performance”; Drying Technology, 11(3), 525-541, 1993.
- Humanes, J.; Civantos, M.; “Producción de aceite de oliva de calidad, Influencia del cultivo”; JUNTA DE ANDALUCIA, Consejería de Agricultura y Pesca, 1992.
- Jiménez, L.; Arraiz, L.; “Estabilidad de los alimentos secos durante el almacenamiento. II Histeresis de la adsorción-desorción, contenido de humedad óptimo”; Ingeniería Química, Julio 1980.
- Jinescu, G.; Lavric, V.; “The Artificial Neural Networks and the Drying Process Modelling”; Drying Technol. 13 (5-7), 1579-1586, 1995.
- Keller, K; Stahl, W.; “Deshidratación de sólidos mediante tamices vibrantes”; Ingeniería Química, Febrero 1996.



- Keys, A.; "Coronary heart disease in seven countries" *Circulation*, 1 suple 1:1-121 **1970**.
- Kindelan, A.; "Molienda y secado de carbón"; *Ingeniería Química*, Febrero **1994**.
- Kiritsakis, A.; "El aceite de oliva", Editorial A. Madrid Vicente. Madrid, 306, **1992**.
- Kneule, F.; "El secado"; *Enciclopedia de la tecnología química I*; Ediciones Urmo, **1966**.
- Kunii, D.; Levenspiel, O.; "Fluidization Engineering"; Editorial Butterworth-Heinemann, **1991**.
- Lai, F., Yiming, C.; Fan, L.; "Modelling and Simulation of a Continuous Fluidized-Bed Dryer"; *Chem. Engng. Sci.* 41 (9), 2419-2430, **1986**.
- Levenspiel, O.; "Ingeniería de las reacciones químicas"; Editorial Reverte, **1975**.
- Martínez, L.; Garrido, S. ; "El alpechín un problema medioambiental en vias de solución I"; *Química e industria*, Noviembre **1994a**.
- Martínez, L.; Garrido, S. ; "El alpechín un problema medioambiental en vias de solución II"; *Química e industria*, Diciembre **1994b**.
- Mataix, J.; "El aceite de oliva en la dieta mediterránea", *Fruticultura Profesional (suplemento)*, 62:129-134. **1994**.
- Nonhebel, G.; Moss, A.; "El secado de sólidos en la industria química"; Editorial Reverte S. A., **1979**.
- Palancar, M.; Aragón, J.; Torrecilla, J.; "pH-Control system based on artificial neural network"; *Volume 37, Number 7*, 2729-2740, **1998**.
- Paláncz, B.; "A Mathematical model for continuous fluidized bed drying"; *Chem. Engng. Sci.* 38 (7), 1045-1059, **1983**.
- Panda, R.; Rao, S.; "Dynamic model of a fluidized bed dryer"; *Drying Technol.* 11 (3), 589-602, **1993**.
- Panda, R.; Rao, S.; "Fluidized bed dryers: dynamic modelling and control"; *Chem. Eng. Technol.* 14, 307-310, **1991**.
- Parker, D.; "Learning-logic invention"; *Invention Report S81-64 File 1, Office of Technology Licensing, Stantford University, Stantford*, **1982**.
- Psaltis, D.; Sideris, A.; Yamamura, A.; "A Multilayered Neural Network Controller"; *IEEE Cont. System Manag.* 8 (2), 17, **1988**.



- Rosenblatt, F.; "The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain". *Psychological Review*, 65, págs. 386-408, 1958. Reimpreso en el texto Anderson J. and Rosenfeld E. ed.; "Neurocomputing"; 92-114, MIT Press, 1988.
- Rumelhart, D.; Hinton, G.; Williams, R.; "Learning Representations by Back-Propagating Errors"; *Nature* 323, 533-536, 1986.
- Sanchez, E.; Plumez, A.; " Caracterización de las emisiones de partículas en el proceso de secado del alpeorujo"; *Alimentación, Equipos y tecnología*; Abril 1998.
- Solinas, M.; "Qualità merceologica degli oli vergini di oliva."; *Riv. Merceologia*, 29(3): 189-221. 1990.
- Stokes, R.; Robison, R.; *Ind. Eng. Chem.*, 41, 2013, 1949.
- Suria, E.; "Secado de orujo de aceituna procedente del decanter de dos fases"; *Alimentación, Equipos y tecnología*, Octubre 1996.
- Tardáguila, J.; Montero, F.; Olmeda, M.; Alba, J.; Bernabéu, R.; "Análisis del sector del aceite de oliva"; *Alimentación, Equipos y Tecnología*, Abril 1996.
- Thibault, J.; Grandjean, B.; "Neural Networks In Process Control. A Survey"; *Proc. IFAC Symp. ADCHEM91, Toulouse (France)*, 295-304, Pergamon Press, N.Y. 1991.
- Tominaga, H.; Tamaki, M.; "Chemical reaction and reactor design"; De. JOHN WILEY & SONS, 1997.
- Torrecilla, J.; "Sistemas de control digital basado en redes neuronales aplicado al control del pH"; *Memoria de investigación, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid*, 1995.
- Trelea, I., Courtois, F.; Trystam, G.; "Modelisation de la Cinétique de Séchage et de la Dégradation de la Qualité Amidonnière du Maïs par Réseaux de Neurons"; *Récents Prog. Génie Procédés* 9 (40), 135-140, 1995.
- Uceda, M.; Hermoso, M.; González, J.; "Evolución de la tecnología del aceite de oliva, nuevos sistemas ecológicos; ensayos y conclusiones"; *Alimentación, equipos y Tecnología*, 5:93-98. 1995a.
- Uceda, M.; Hermoso, M.; González, F.; González, J.; "Evolución de la tecnología de extracción del aceite de oliva"; *Alimentación Equipos y tecnología*, abril 1995b.
- Uceda, M.; Hermoso, M.; González, J.; "Evolución de la tecnología del aceite de oliva, nuevos sistemas ecológicos ensayos y conclusiones"; *Alimentación Equipos y tecnología*, 5, 1993.



- Valiente, C.; Arrigoni, E.; Corrales, J.; Esteban, R.; Amado, R.; “Composición de la fibra alimenticia en el orujo de aceituna. Aminoácidos asociados a la fibra insoluble, soluble y total”; *Grasas y Aceites*; Vol. 46, Fasc. 2, **1995**.
- Van Breusegem, V.; Thibault, J.; Chérury, A.; “Adaptive Neural Models for On-Line Prediction in Fermentation”; *Can. J. Chem. Engng.* 69, 481-487, **1991**.
- Venkatasubramanian, V.; Chan, K.; “A Neural Network Methodology for Process Fault Diagnosis”; *AIChE J.* 35 (12), 1993-2002, **1989**.
- Vian, A.; Ocon, J.; “Elementos de Ingeniería Química”; 5ª edición, Editorial Aguilar, **1969**.
- Viswanathan, K.; “Model for Continuous Drying of Solids in Fluidized/Spouted Beds”; *Can. J. Chem. Engng.* 64 (2), 87-95, **1986**.
- Wenzel, L.; White, R.; “Drying Granular solids in superheated steam”; *Ind. Eng. Chem.*, 43, 1829, **1953**.
- Werbos, P.; “Beyond regression: New Tools for predictions and analysis in behavioral Sciences”; Ph D. Thesis, Harvard University, **1974**.
- Wink, W. A.; *Ind. Eng. Chem.*, 18, 251, **1946**.
- Zahed, A.; Zhu, J.; Grace, J.; “Modelling and Simulation of Batch and Continuous Fluidized Bed Dryers”; *Drying Technol.* 13 (1-2), 1-28, **1995**.

9.- APÉNDICE



9.- APÉNDICE

MODELIZADOR NEURONAL

'TESIS TORRECILLA SIMULADOR NEURAL v 1.6 -J.S.T.V.- ENERO'96
'PERCEPTRON MULTICAPA

CLS
RANDOMIZE 1

'-----AJUSTAR LOS DIRECTORIOS NECESARIOS-----
CHDIR "C:\COMPIS\QUICKBASIC\TESIS\CONTROL\PERCEPTR\DATOS"
CHDIR "C:\SANTIAGO\TESIS\CONTROL\PERCEPTR"

'APERTURA DE FICHEROS
' PRED25 FICHERO CON EL QUE SE HA OPTIMADO LA RED, 29 VERIFICACION
OPEN "O", #2, "E3418525.DAT"
OPEN "I", #3, "PRUE25.DAT"
OPEN "I", #4, "PRUE25.DAT"
OPEN "O", #7, "PRED252.DAT"

5 ' TAMAÑO DEL FICHERO #3
 IF EOF(3) THEN GOTO 8
 INPUT #3, A, B, C, D
 FILAS = FILAS + 1
 GOTO 5
8 CLOSE #3

' DATOS DE TOPOLOGIA DE LA RED
CAPAS = 3
N(1) = 3
N(2) = 4
N(3) = 1
INTER = 1
NU = .85

datot = (N(1) + 1) / 2
DATOH = N(1) - datot
normalt = 400
normalh = 100
'PRINT #2, N(1), N(2), N(3), NU

' DIMENSIONADO DE VARIABLES
FOR A1 = 1 TO CAPAS
 IF N(A1) > MAXIMO THEN MAXIMO = N(A1)
NEXT A1



```
DIM ent(4, FILAS)'1.-TIEMPO, 2.-T ENTRADA, 3.-T LECHO, 4.-HUMEDAD
DIM W(CAPAS - 1, MAXIMO, CAPAS, MAXIMO), x(CAPAS, MAXIMO), ERIN(N(3))
DIM W1(CAPAS - 1, MAXIMO, CAPAS, MAXIMO)
```

```
' ELECCION DEL FICHERO DE PESOS
```

```
PRINT "DESEAS PESOS DE FICHERO (S/N)": ELE1$ = INPUT$(1)' ELE1$ = "n":
```

```
IF UCASE$(ELE1$) = "S" THEN
```

```
    INPUT "QUE FICHERO DESEAS F____.DAT"; FICHERO1$
```

```
    OPEN "I", #1, "F" + FICHERO1$ + ".DAT"
```

```
    FOR I = 1 TO CAPAS - 1
```

```
        FOR J = 1 TO N(I)
```

```
            FOR L = 1 TO N(I + 1)
```

```
                INPUT #1, W(I, J, I + 1, L)
```

```
            NEXT L
```

```
        NEXT J
```

```
    NEXT I
```

```
    CLOSE #1
```

```
' REALIZACION DE PREDICCIONES DE TEMPERATURA
```

```
PRINT "DESEAS REALIZAR PREDICCIONES DE TEMPERATURA (S/N)":
```

```
ELE2$ = INPUT$(1)
```

```
PRINT "DESEAS REALIZAR PREDICCIONES CON FICHERO (S/N)":
```

```
ELE4$ = INPUT$(1)
```

```
IF UCASE$(ELE2$) = "S" THEN
```

```
    PREDICCION = 1
```

```
    IF UCASE$(ELE4$) = "S" THEN PREDFICHERO = 1: PREDICCION = 0
```

```
    GOSUB 1000
```

```
END IF
```

```
GOTO 10
```

```
END IF
```

```
' PESOS ALEATORIOS
```

```
FOR I = 1 TO CAPAS - 1
```

```
    FOR J = 1 TO N(I)
```

```
        FOR L = 1 TO N(I + 1)
```

```
            W(I, J, I + 1, L) = RND 'PESOS ANTES
```

```
        NEXT L
```

```
    NEXT J
```

```
NEXT I
```

```
' ASIGNACION DE VALORES
```

```
10 ' EMPIEZA EL CICLO DE LA RED
```



```

' VALORES DE ENTRADA
FOR A1 = 1 TO FILAS
    INPUT #4, A, ent(2, A1), ent(3, A1), ent(4, A1)
NEXT A1
conta = 1

11 '
FOR x = 1 TO datot
    IF x = datot THEN conta = conta + 1
    x(1, x) = ent(3, conta) / normalt
    IF x + datot <= N(1) THEN x(1, x + datot) = ent(4, conta) / normalh
NEXT x

FOR X1 = 1 TO N(3)
    y(X1) = ent(4, conta) / normalh
NEXT X1

' CALCULO NEURONAL

    ' SALIDA DE CADA NEURONA
    FOR I = 2 TO CAPAS
        FOR J = 1 TO N(I)
            F = 0
            FOR L = 1 TO N(I - 1)
                F = F + W(I - 1, L, I, J) * x(I - 1, L)
            NEXT L
        NEXT J
    NEXT I

' FUNCION SIGMOIDAL
    F = 1 / (1 + EXP(-F))
    x(I, J) = F
NEXT J
NEXT I

' CALCULO DEL ERROR PARA LA OPTIMACION DE LA RED
'E1 = ENE(1)
FOR J = 1 TO N(CAPAS)
    ENE1(J) = (1 / 2) * (x(CAPAS, J) - y(J)) ^ 2
    'ENE(J) = E1 + ENE1(J)
NEXT J

' OPTIMACION DE PESOS
' ERRORES

```



```

FOR V = 1 TO N(3)
  ERIN(V) = (x(3, V) - y(V))
  ERIN1(V) = ABS(x(3, V) - y(V))
  'PRINT ERIN(V)
  ERIN = ERIN + ERIN1(V)
NEXT V

'OPTIMACION DE LOS PESOS
FOR J = 1 TO N(3)
  FOR I = 1 TO N(2)
    W(2, I, 3, J) = W(2, I, 3, J) - NU * ERIN(J) * x(3, J) * (1 - x(3, J)) * x(2, I)
    W1(2, I, 3, J) = W(2, I, 3, J)
  NEXT I
NEXT J
FOR I = 1 TO N(1)
  FOR J = 1 TO N(2)
    SUMDE = 0
    FOR L = 1 TO N(3)
      SUMDE = SUMDE + ERIN(L) * x(3, L) * (1 - x(3, L)) * W1(2, J, 3, L)
    NEXT L
    W(1, I, 2, J) = W(1, I, 2, J) - NU * SUMDE * x(2, J) * (1 - x(2, J)) * x(1, I) 'PESOS
  NEXT J
NEXT I

DESPUES2
NEXT J
NEXT I

' CONTADOR Y REPRESENTACION EN PANTALLA
'IF CONTA = 2 THEN
'  INTER1 = INTER1 + 1      'CONTADOR
'  IF INTER / 10 = INT(INTER / 10) THEN
'    FOR JOE = 1 TO N(3)
'      PRINT "ERROR ES"; ERIN; "EN LA INTERACION"; INTER1
'      PRINT
'    NEXT JOE
'  END IF
'END IF

'IF CONTA = 2 THEN
'  PRINT #2, INTER1, ERIN
'  ERIN = 0
'END IF

```



```

FOR SA = 1 TO N(3)
    ENE(SA) = 0
NEXT SA

INTER = INTER + 1      'CONTADOR
IF conta = FILAS THEN
    INTER1 = INTER1 + 1
    IF INTER1 / 100 = INT(INTER1 / 100) THEN PRINT "ERROR ES"; ERIN; "EN LA
INTERACION"; INTER1: PRINT
    conta = 1
    'PRINT #2, INTER1, ERIN
    LOCMIN = ERINOLD - ERIN
    ERINOLD = ERIN
    ERIN = 0
END IF

'PARAR EN EL MINIMO ERROR
IF LOCMIN < 0 AND INTER1 > 2 THEN
    ULTIMO = 1
    PRINT "ERROR ES"; ERINOLD; "EN LA INTERACION"; INTER1
    PRINT "SE HA ALCANZADO UN MINIMO, "DESEAS GUARDAR LOS PESOS?
(S/N)": ELE4$ = INPUT$(1)
    LOCMIN = 0
    IF UCASE$(ELE4$) = "S" THEN GOTO 101 ELSE GOTO 150

END IF
IF conta = FILAS THEN ERINOLD = ERIN

100 'GUARDA PESOS OPTIMADOS
IF UCASE$(INKEY$) = "F" THEN
101  INPUT ""QUE FICHERO DESEAS PES _____.DAT"; FICHERO2$
    OPEN "O", #5, "F" + FICHERO2$ + ".DAT"
    OPEN "O", #6, "F" + FICHERO2$ + ".AYU"

    PRINT #6, N(1), N(2), N(3), NU

    FOR I = 1 TO CAPAS - 1
        FOR J = 1 TO N(I)
            FOR L = 1 TO N(I + 1)
                PRINT #5, W(I, J, I + 1, L)
            NEXT L
        NEXT J
    NEXT I

    CLOSE #5
    CLOSE #6
END

```



END IF

'ABRIR UN FICHERO PARA REPRESENTAR LOS PREDICHOS
 'IF ULTIMO = 1 THEN PRINT #7, Y(1) * NORMALH, X(3, 1) * NORMALH
 IF INTER1 = 49 THEN PRINT #7, y(1) * normalh, x(3, 1) * normalh: PRINT COPIANDO: CLS

'150 IF INTER < 15000 * FILAS THEN GOTO 11
 150 GOTO 11
 END

' ++++++ SUBRUTINAS ++++++
 1000 ' REALIZACION DE PREDICIONES DE TEMPERATURAS
 IF PREDICCION = 1 THEN

 INPUT "TEMPERATURA DE ENTRADA DEL AIRE"; x(1, 1)
 INPUT "TEMPERATURA DEL LECHO"; x(1, 2)
 INPUT "HUMEDAD DEL LECHO ANTERIOR"; x(1, 3)
 x(1, 1) = x(1, 1) / normalt
 x(1, 2) = x(1, 2) / normalt
 x(1, 3) = x(1, 3) / normalh
 FILAS = 1

END IF

'ASIGNACION DE VALORES POR FICHERO
 IF PREDFICHERO = 1 THEN

' VALORES DE ENTRADA
 FOR A1 = 1 TO FILAS
 INPUT #4, A, ent(2, A1), ent(3, A1), ent(4, A1)
 NEXT A1
 conta = 1

END IF

1005 'SALIDA DE CADA NEURONA

conta = 0
 FOR asd = 1 TO FILAS
 FOR x = 1 TO datot
 IF x = datot THEN conta = conta + 1
 x(1, x) = ent(3, conta) / normalt
 IF x + datot <= N(1) THEN x(1, x + datot) = ent(4, conta) / normalh
 NEXT x

 FOR X1 = 1 TO N(3)
 y(X1) = ent(4, conta) / normalh
 NEXT X1



```

'PRINT
'PRINT x(1, 3)
IF asd > 2 THEN x(1, 3) = x(3, 1)
'PRINT x(1, 3)

' CALCULOS RELATIVOS A LA RED
FOR I = 2 TO CAPAS
  FOR J = 1 TO N(I)
    F = 0
    FOR L = 1 TO N(I - 1)
      F = F + W(I - 1, L, I, J) * x(I - 1, L)
    NEXT L

' FUNCION SIGMOIDAL

F = 1 / (1 + EXP(-F))

x(I, J) = F
NEXT J
  NEXT I

  PRINT #7, y(1) * normalh, x(3, 1) * normalh
NEXT asd
END
PRINT "LA HUMEDAD ACTUAL SERA"; x(3, 1) * normalh

PRINT "DESEAS OTRA PREDICCION (S/N)": ELE3$ = INPUT$(1)
IF UCASE$(ELE3$) = "S" THEN GOTO 1000
RETURN

```

