



**MÁSTER EN SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN LOS EDIFICIOS Y EN LA INDUSTRIA.**

2011/2012

TRABAJO FIN DE MASTER

***DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROCESO DE SECADO
DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS CON
FINES TERMICOS.***

ALUMNO

D. PEDRO JAVIER QUESADA LABESA

DIRECTOR DEL TRABAJO

Dr. D. SEBASTIÁN SÁNCHEZ VILLASCLARAS

Catedrático de Universidad, Área de Ingeniería Química.



MÁSTER EN SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS EDIFICIOS
Y EN LA INDUSTRIA - 2011/2012

Pedro Javier Quesada Labesa



TRABAJO FIN DE MÁSTER:
DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROCESO
DE SECADO DE MATERIALES
LIGNOCELULÓSICOS CON FINES TÉRMICOS.

UNIVERSIDAD DE JAÉN
MÁSTER EN SOSTENIBILIDAD Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA.

FECHA:
CURSO 2011/2012

ALUMNO:
PEDRO JAVIER QUESADA LABESA

ÍNDICE DOCUMENTAL:

1.- MEMORIA

2.- ANEXOS

3.- PLANOS

4.- PLIEGO DE CONDICIONES

5.- PRESUPUESTO



ÍNDICE

DOCUMENTO 1. Memoria

1. ANTECEDENTES Y FINALIDAD DEL PROYECTO	7
2. OBJETIVO.....	7
2.1 Objetivo General.	
2.2 Objetivos Específicos.	
3. INTRODUCCIÓN.....	9
4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	14
5. DESCRIPCION DEL PROYECTO.....	22
6. ETAPAS DE LA OBTENCIÓN DEL PRODUCTO LIGNOCELULÓSICO EN ESTUDIO.....	24
6.1. Primera Etapa. Elaboración de aceites de oliva y aceitunas de mesa.	
6.1.1. Proceso Común. Lavado y Pesado.	
6.1.2. Proceso Tradicional.	
6.1.3. Proceso Moderno – Proceso de 2 o 3 fases.	
6.1.4. Industrias de las aceitunas de mesa.	
6.2. Segunda Etapa. Generación y aprovechamiento de los subproductos generados en ambas industrias.	
6.2.1. Residuos líquidos.	
6.2.2. Residuos sólidos de ambas industrias.	
7. REVISIÓN DE CONOCIMIENTOS EN PROCESOS DE SECADO.....	41
7.1. Tipos de secadores.	
8. DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DEL EQUIPO SELECCIONADO.....	47
8.1. Introducción al equipo seleccionado.	
8.2. Secador de transporte neumático.	
8.3. Marco teórico.	
8.3.1. Consumo de calor Unitario y Eficiencias Térmicas.	
8.4. Diseño del separador de ciclón.	
9. CUMPLIMIENTO DE LA LEGISLACIÓN VIGENTE.....	64
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
11. CONCLUSIÓN.....	66



DOCUMENTO 2. Anexos a la Memoria.

ANEXO 1: CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS DEL TRANSPORTE NEUMÁTICO

ANEXO 2: CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS DEL INTERCAMBIO DE CALOR

ANEXO 3: ESTUDIO Y PRUEBAS DE SECADO REALIZADAS EN LABORATORIO

ANEXO 4. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LA BIOMASA

ANEXO 5: ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA INVERSIÓN

ANEXO 6: ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD.

ANEXO 7: LEGISLACIÓN

DOCUMENTO 3. Planos

DOCUMENTO 4. Pliego de condiciones

DOCUMENTO 5. Mediciones y Presupuesto



TRABAJO FIN DE MÁSTER:
DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROCESO
DE SECADO DE MATERIALES
LIGNOCELULÓSICOS CON FINES TÉRMICOS.

UNIVERSIDAD DE JAÉN
MÁSTER EN SOSTENIBILIDAD Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA.

FECHA:
CURSO 2011/2012

ALUMNO:
PEDRO JAVIER QUESADA LABESA

DOCUMENTO N°1:

MEMORIA



MEMORIA

1. ANTECEDENTES Y FINALIDAD DEL PROYECTO.

Se redacta el presente proyecto a tenor de lo exigido en la legislación vigente y como justificación del Trabajo Final de Master en '*Sostenibilidad y Eficiencia Energética en los Edificios y en la Industria*', al objeto de llevar a cabo el estudio de las instalaciones de diseño y desarrollo de un proceso de secado de materiales lignocelulósicos con fines térmicos.

El promotor de dicho diseño es "UNIVERSIDAD DE JAEN" con CIF.: Q7350006H y domicilio en C ampus las Lagunillas de la ciudad de Ja en.

2. OBJETIVO DEL PROYECTO.

2.1. OBJETIVO GENERAL.

Este trabajo trata de diseñar un proceso de secado de materiales lignocelulósicos, mejorando el proceso de transformación de estos subproductos para la preparación de esta materia en combustible sólido biomásico de calidad óptima, realizando una caracterización y certificación del producto final.

Debido a la amplitud que requiere este estudio para los diversos subproductos derivados del olivar, este trabajo se va a centrar en el tratamiento de uno de los subproductos de la aceituna; se tratar  la caracterización del **Hueso de Aceituna**, realizando al material la mejora de uno de los problemas más importantes existente en el proceso de transformación de estos materiales concretamente, la eliminación de varios elementos constituyentes que la materia tiene en su composición o que la ha adquirido en su acopio y traslado, que hacen que se produzca una combustión incompleta en los generadores de calor.



2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Disminuir el porcentaje de humedad y materia volátil del hueso de aceituna, procedente de la separadora de pulpa y hueso, hasta la humedad relativa de equilibrio del material considerada antes 8%-12%.
- Reducir el nivel de sílice en el material lignocelulósico, con el fin de disminuir el porcentaje de cenizas en el proceso de combustión.
- Eliminar restos de pulpa y piel de la aceituna que acompañan al hueso entero o a los fragmentos de hueso, con objeto de evitar olores desagradables en el proceso de combustión y depósitos de alquitranes en las paredes de las cámaras de combustión de los generadores.
- Minimizar el consumo de energía en el propio proceso de transformación del material lignocelulósico, con respecto a los empleados en la actualidad.
- Mejorar el proceso de secado considerando un tipo de equipo apropiado y adaptado al tipo de clasificación y al rango de humedad y materia volátil que hay que eliminar.

El cumplimiento de estos objetivos aumentaría el rendimiento del generador de calor, evitando problemas de atascamientos en el hogar de combustión, y en general la adaptación del biocombustible sólido a la normativa vigente.



3. INTRODUCCIÓN

El motivo de dedicar el tiempo a la elaboración de un estudio en el proceso de secado de materiales lignocelulósicos, es como consecuencia de la necesidad que existe en el mercado de la mejora de la calidad de los productos lignocelulósicos con fines térmicos. En cumplimiento de una normativa vigente, que indica los valores máximo de %humedad, cenizas, tamaño, emisiones a la atmósfera, etc.

Según la Directiva 2009/28/CE de 23 de abril de 2009 que relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, define la biomasa como:

“La fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales”

La biomasa es una energía renovable, ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar, fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua. De esta forma este aprovechamiento energético de los residuos agrícolas reduce la dependencia energética del exterior y contribuye las disminuciones de CO₂ a la atmósfera, ayudando así a frenar el cambio climático.

Los factores que condicionan el consumo de biomasa en Europa son:

- Factores geográficos: debido a las condiciones climáticas de la región, las cuales indicarán las necesidades de calor que requiera cada zona, y las cuales podrán ser cubiertas con biomasa.
- Factores energéticos: por la rentabilidad o no de la biomasa como recurso energético. Esto dependerá de los precios y del mercado energético en cada momento.



- Disponibilidad del recurso: este es el factor que hay que estudiar en primer lugar para determinar el acceso y la temporalidad del recurso.

Tipo de biomasa

Existen diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados como recurso energético. Aunque se pueden hacer multitud de clasificaciones, en este estudio se ha escogido la clasificación más aceptada, la cual divide la biomasa en cuatro tipos diferentes: biomasa natural, residual seca y húmeda y los cultivos energéticos.

- Biomasa Natural:

Es la que se produce en la naturaleza sin ninguna intervención humana. El problema que presenta este tipo de biomasa es la necesaria gestión de la adquisición y transporte del recurso al lugar de utilización. Esto puede provocar que la explotación de esta biomasa sea inviable económicamente.

- Biomasa Residual (Seca y Húmeda)

Son los residuos que se generan en las actividades de agricultura (leñosos y herbáceos) y ganadería, en las forestales, en la industria maderera y agroalimentaria, entre otras y que todavía pueden ser utilizados y considerados subproductos. Como ejemplo podemos considerar el aserrín, la cáscara de almendra, el orujillo, las podas de frutales, etc. Se denomina biomasa residual húmeda a los vertidos llamados biodegradables, es decir, las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos (principalmente purines).

- Cultivos Energéticos

Estos cultivos se generan con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Estos cultivos los podemos dividir en:

- o Cultivos ya existentes como los cereales, oleaginosas, remolacha, etc.
- o Lignocelulósicos forestales (chopo, sauces, etc.)
- o Lignocelulósicos herbáceos como el cardo *Cynara cardunculus*



- Otros cultivos como la patata

Por este motivo, los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan biocombustibles. Estos biocombustibles, según su estado físico, pueden ser clasificados en:

- Biocombustibles sólidos, en referencia a los que son utilizados básicamente para fines térmicos y eléctricos.
- Biocombustibles líquidos, los biocarburantes para automoción.

La biomasa, como energía renovable, permite acumular la energía que se ha fijado durante el periodo de crecimiento de la planta. A través de distintos procesos de transformación, esta energía se libera, obteniendo calor, electricidad o energía mecánica.

Ventajas

- Disminución de las emisiones de CO₂, aunque para el aprovechamiento energético de esta fuente renovable tengamos que proceder a una combustión, y el resultado de la misma sea agua y CO₂, la cantidad de este gas causante del efecto invernadero, se puede considerar que es la misma cantidad que fue captada por las plantas durante su crecimiento. Es decir, que no supone un incremento de este gas a la atmósfera.
- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas.
- Si se utilizan residuos de otras actividades como biomasa, esto se traduce en un reciclaje y disminución de residuos. Canaliza, por tanto, los excedentes agrícolas alimentarios, permitiendo el aprovechamiento de las tierras de retirada.
- Los cultivos energéticos sustituirán a cultivos excedentarios en el mercado de alimentos. Eso puede ofrecer una nueva oportunidad al sector agrícola.
- Permite la introducción de cultivos de gran valor rotacional frente a monocultivos cerealistas.
- Puede provocar un aumento económico en el medio rural
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.

Inconvenientes



- Tiene un mayor coste de producción frente a la energía que proviene de los combustibles fósiles.
- Menor rendimiento energético de los combustibles derivados de la biomasa en comparación con los combustibles fósiles.
- Producción estacional
- La materia prima es de baja densidad energética lo que quiere decir que ocupa mucho volumen y por lo tanto puede tener problemas de transporte y almacenamiento.
- Necesidad de acondicionamiento o transformación para su utilización.

Activadores de la biomasa en Andalucía.

Así el plan energético de Andalucía como documento básico de la planificación energética de nuestra comunidad planteaba dentro de sus objetivos que en el año 2010, al menos el 15% de la energía consumida en Andalucía sea de origen renovable. Objetivo que supera en un 12% lo que recoge el libro blanco del 1997, sobre las energías renovables de la unión europea.

El impulso de la biomasa es uno de los objetivos de la junta de Andalucía en general y de la Consejería de innovación ciencia y empresa y la Agencia Andaluza de la Energía, en particular y en ese sentido hay marcada una clara estrategia que conduce hacia los objetivos fijados y que convergen diversas actuaciones.

En la actualidad, la biomasa alcanza el 45% de la producción con energías renovables en España, lo que equivale al 2,9% respecto del total de consumo de energía primaria, incluidas las convencionales. Tanto en aplicaciones eléctricas como térmicas los recursos más utilizados son los residuos procedentes de industrias forestales y agrícolas. El mayor consumo se da en Andalucía, Galicia, y Castilla y León, debido principalmente a la presencia en ellas de empresas que consumen grandes cantidades de biomasa, a la existencia de un sector forestal desarrollado y la diseminación de la población que facilita el uso de la biomasa doméstica.



La biomasa en Andalucía es, de todas las fuentes de renovables, la que más cantidad de energía puede aportar al sistema. Por tanto, en un marco energético en el que prime la sostenibilidad, la diversificación y un elevado grado de autoabastecimiento, la biomasa juega un papel fundamental, y es por ello que las distintas administraciones, tanto en el ámbito regional y nacional como en el ámbito europeo están apostando de forma decidida por esta energía renovable.

No obstante aun queda un largo recorrido para alcanzar los objetivos propios marcados, ya que solo se aprovecha en la actualidad el 30% del potencial existente.



4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

El cultivo del olivo tiene orígenes muy antiguos y su área característica de crecimiento era la ribera del Mediterráneo, comprendida entre los paralelos 35° y 45° de latitud Norte. En la Figura 1, encontramos olivares en regiones lejanas como los Estados Unidos, o en países como Argentina, Nueva Zelanda o Australia, Japón, China, África del Sur y hasta en India.

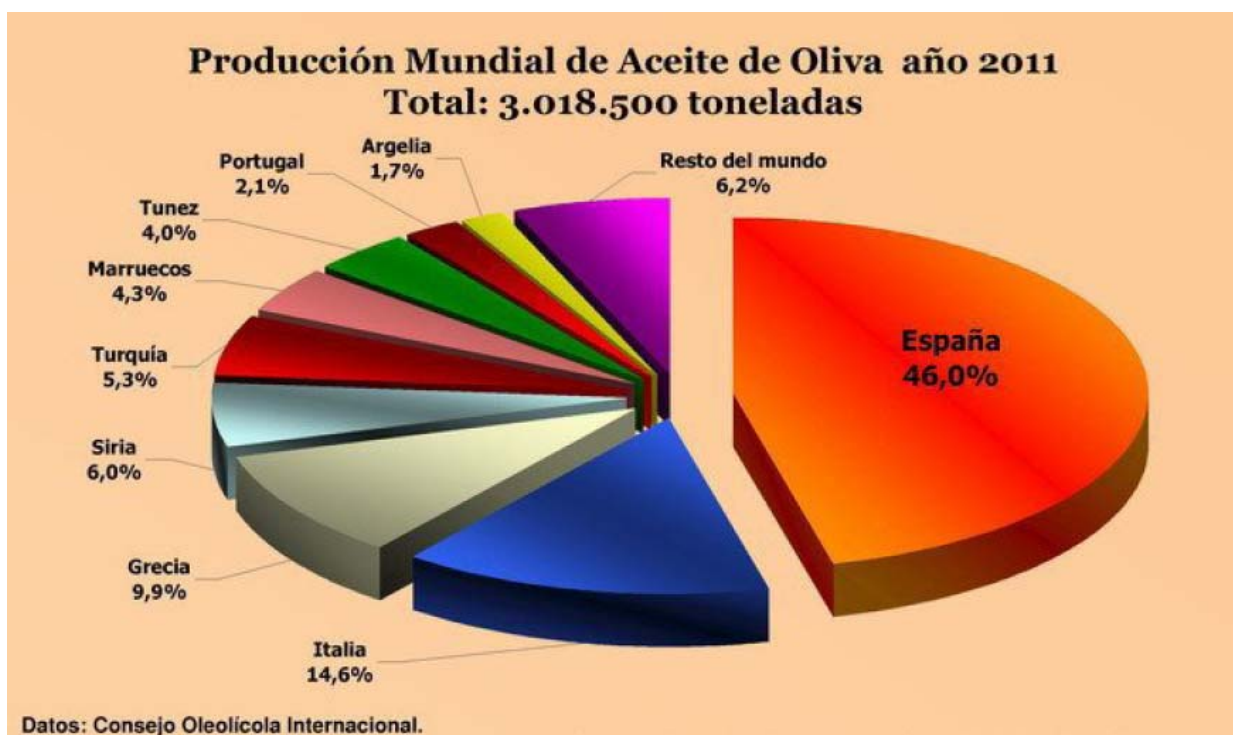


Figura 1. Distribución geográfica actual del olivar en el mundo.

El olivo, '*Olea Europaeal*', es un árbol resistente que llega a desarrollarse y a conseguir una completa maduración de sus frutos en alturas comprendidas entre los 600-700 m sobre el nivel del mar, aunque en algunas regiones de España también se cultiva más allá de los 1.000 m de altura; resiste temperaturas por debajo de los - 7 °C y es capaz de soportar largas sequías en verano. Es cultivado en áreas con pluviosidad media de 350/400 mm anuales y temperaturas veraniegas de hasta 40°C.

El fruto del olivo es una drupa y está formada por 4 partes: la parte exterior o epicarpio o piel, la parte mediana o mesocarpio o pulpa, de la que se extrae el aceite y la parte interna, endocarpio o hueso de aceituna y la semilla o núcleo (Figura 2 y Tabla 1).

Tabla 1. Composición del fruto del olivo en % del peso seco (Nefzaoui et al, 1983)

Epicarpio	Mesocarpio	Endocarpio	Semilla
2,0-2,5	17,5-80,5	17,3-23,0	2,2-5,5

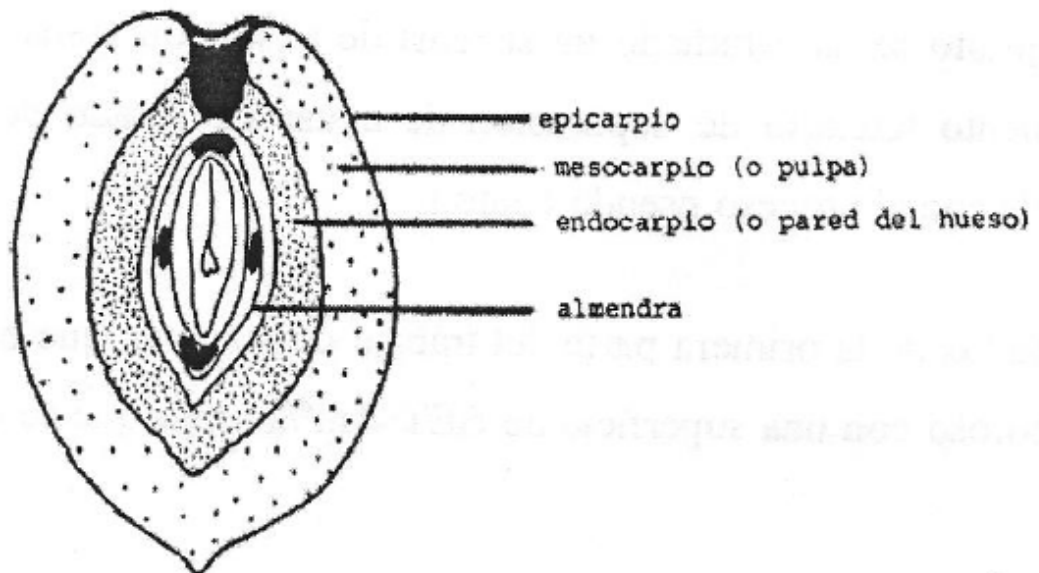


Figura 2. Sección transversal del fruto de aceituna (Maymone et al, 1961).

Existen muchas variedades de aceituna. En España hay más de 250 variedades de las que podemos citar como las más importantes: ‘Picual’, ‘Hojiblanca’, ‘Cornicabra’, ‘Lechín’, ‘Arbequina’, ‘Picudo’, ‘Empeltre’, ‘Farga’ y ‘Gordal’.

La densidad de la plantación es un factor muy importante a la hora de la producción y la comercialización del producto final. Según *Barranco et al, 2007*, la densidad de plantación en el sistema tradicional es inferior a 100 árboles/ha, con una producción en secano entre 1000 y 3000 kg/ha y en riego entre 3000-7000 kg/ha, algo que hoy día ha cambiado bastante con la mejora de las técnicas de riego, con la fertilización y con la mecanización del sector, adaptando



nuevos sistemas de plantación como el intensivo y el superintensivo. Según la misma fuente, la densidad de la plantación en el olivar intensivo es entre 200-400 árboles/ha con una producción que varía del secano al riego entre 5000-6000 a 8000-12.000 kg/ha. En el superintensivo la densidad de plantación es superior a 1500 árboles/ha con unas producciones altas entre 10.000 y 15.000 kg/ha. Arbequina, Koroneiki, Urano y Chiquita son algunas de las variedades que mejor se adaptan a este nuevo marco.



Figura 3. Imagen del cultivo del olivar tradicional



Figura 4. Imagen del cultivo del olivar superintensivo.

Según *Pastor et al, 2000*; el marco de plantación del olivar intensivo es del orden 7x7m con una densidad de 250 a 300 árboles/ha. El marco de plantación del olivar superintensivo es de (3x2,22) m y (3x1,33) m con una densidad de 1500 a 2500 árboles/ha.

Acosta et al, 2009; recomienda densidades de plantación comprendidas entre 1.400 y 2.000 olivos/ha, recomienda emplear una calle de 3,75 a 4,00 m con separaciones entre árboles en la línea en función de la calidad del suelo y la orientación de la plantación, pero siempre en una margen de 1,30 a 1,50 m, que permiten obtener la densidad adecuada.

El cultivo del olivar se dedica a dos usos, que son la obtención de aceite de oliva y la producción de aceitunas de mesa. La proporción más importante se dedica a la extracción de aceite de oliva.

Las cantidades de aceite de oliva y aceitunas de mesa que se producen a escala mundial son de una gran trascendencia económica y social. Por ello, desde hace tiempo existe un



organismo dependiente de las Naciones Unidas, el Consejo Oleícola Internacional (COI), encargado de la regulación, promoción, fomento de la investigación, etc., de ambos productos.

La superficie actual del olivar en España es de 2.552.727 *ha* de la cual 2.459.305 *ha* es para aceitunas de almazara y 93.422 *ha* para aceituna de mesa (COAG, 2009).

Según el COI (COI, 2009), para la campaña 2008-2009, la producción mundial de aceite de oliva ha sido en torno de 2,7 *Mt* de los que 1 *Mt* corresponde a España, siendo Andalucía la principal productora con aproximadamente 0,9 *Mt*. En esa misma campaña la exportación de la UE en materia de aceite de oliva a países no comunitarios llega a 650.000 *t*.

Según las mismas fuentes, la producción mundial de aceituna de mesa se ha reducido de 780.000 *t* de la campaña (2007-2008) a 640.000 *t*, correspondiente a la campaña (2008-2009), de las que 560.000 *t* se han producido en la UE, de ellas 500.000 *t* corresponden a España.

En Andalucía durante el año 2011 se alcanzó una superficie de cultivo de olivar de 1.500.000 *ha* que cada año producen, en campaña media, unas 4.650.000 *t* de aceituna. De éstas, aproximadamente 4.300.000 *t/año* se destinan a obtención de aceite de oliva, y las restantes a la industria de aderezo de aceituna de mesa. De la cantidad destinada a la obtención de aceite se obtiene unos 900.000 *t* de aceite, de oliva anuales.

La predominancia del cultivo del olivar en Jaén que se contabiliza en unas 550.000 *ha*, supone casi el 33% del total de superficie de olivar que hay en toda Andalucía, hace que sea en esta provincia donde tenga sentido el estudio que se está realizando, puesto que es en esta provincia donde predomina el consumo de los residuos lignocelulósicos con fines térmicos procedentes del olivar.

Pero además este cultivo y sus industrias derivadas nos ofrecen una serie de subproductos con un contenido energético importante, que a través de una tecnología adecuada puede obtenerse, energía térmica, electricidad, e incluso biocarburantes para el transporte. Son productos obtenidos de recursos energéticos autóctonos y renovables.



De los subproductos obtenidos del cultivo del olivar, los subproductos susceptibles de valorización energética son:

- Poda de olivar.
- Orujo
- Orujillo
- Hueso de aceituna

El balance de masas que se obtiene del cultivo del olivar de poda de olivar se resume en la Figura 5, donde se puede apreciar la cantidad de poda producida en cada tipo de cultivo. Se indica el valor mínimo, máximo y media ponderada de residuos que se obtiene de 1 ha cada año.

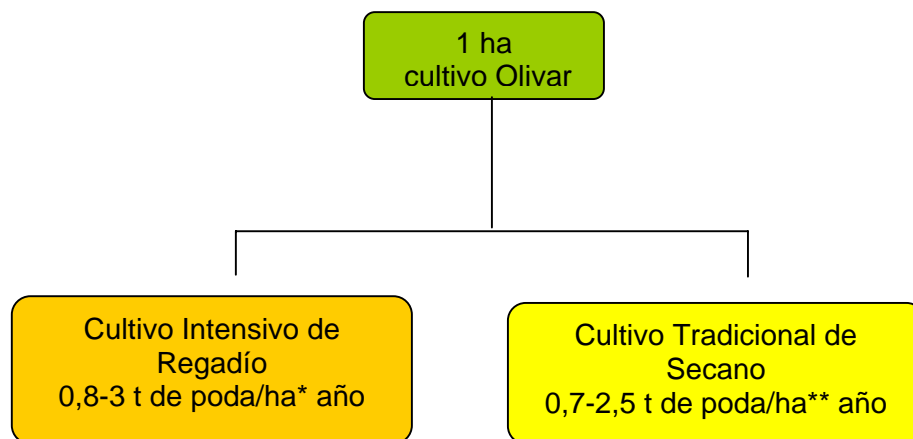


Figura 5. Producción por hectárea en residuo de poda en cultivos tradicional e intensivo.

* *Cultivo intensivo de regadío, poda anual, olivos entre 10 y 15 años, marcos de plantación de 6x4 y 7x5 (416 y 280 árboles/ha, respectivamente) y producción media de aceituna de 4.000 a 6.000 kg/ha.*

***Cultivo extensivo de secano en campiña, poda bianual, olivos de 80 años, marco de plantación de 10x10 (100 árboles/ha) y producción media de aceituna de 4.000 kg/ha.*



Otro balance de masas puede verse en la Figura 6, donde se desglosa el porcentaje de productos obtenidos de 1 tonelada de aceituna.

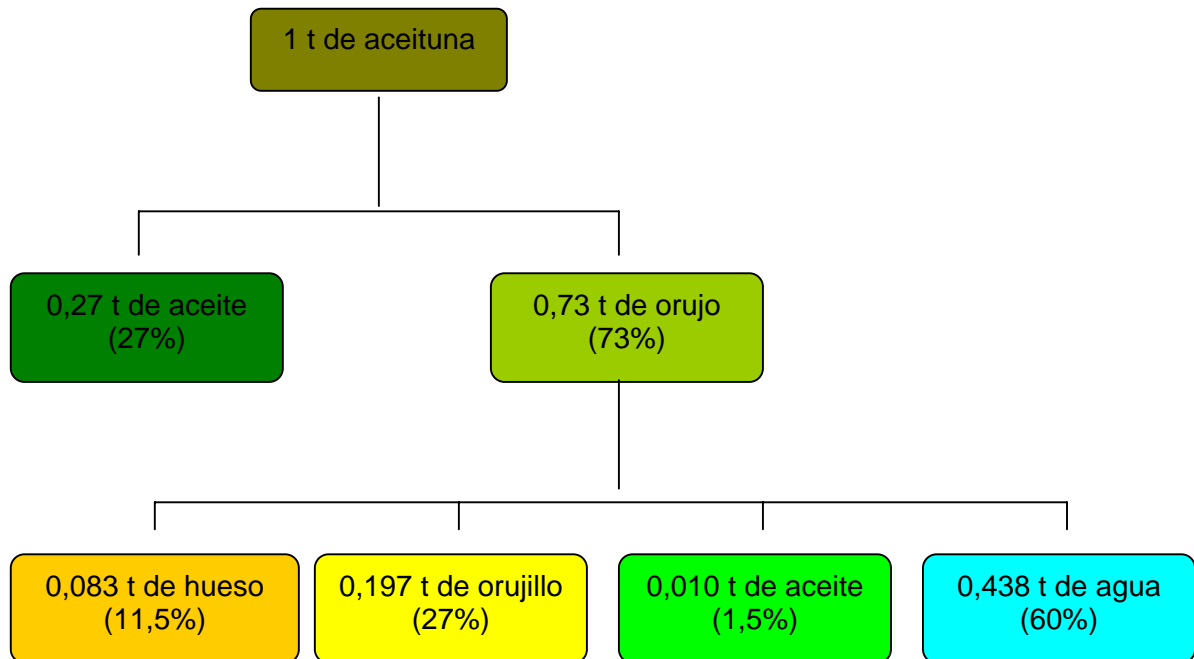


Figura 6. Desglose de 1 t aceituna en productos, subproductos y residuos.

Para mantener en óptimas condiciones el cultivo del olivar, los agricultores podan los árboles cada dos años obteniendo de cada hectárea de olivar unos 6.000 kg de poda (en olivar tradicional e incluida la leña), que puede aprovecharse para calentar nuestras viviendas o para generar electricidad de forma limpia. Para entender toda la energía que supone toda esa poda, basta decir que podría alimentar una central de generación eléctrica de mas de 200 MW, proporcionando energía para el suministro eléctrico de unas 350.000 familias. (Fuente: Agencia Andaluza de la Energía).

La contribución energética del olivar podrá incrementarse sólo si se valoriza adecuadamente la poda y la hoja de almazara, ya que tanto orujos, orujillo y el hueso, se vienen empleando ya casi en su totalidad en proyectos energéticos y existe muy poco margen para la puesta en marcha de nuevos proyectos a partir de estas biomásas.



El uso energético de la poda ha estado ligado tradicionalmente al empleo de la leña como combustible doméstico. Sin embargo, durante la última década, el uso de la poda de olivo como combustible en forma de astilla ha experimentado un notable incremento debido a:

- La mejora de la retribución económica de los residuos agrícolas para generación de electricidad en el RD 661/20071.
- La necesidad de introducir nuevas fuentes de biomasa en plantas de generación eléctrica existentes y de nueva construcción.
- Expectativas surgidas en torno a la producción de pellets para uso doméstico.

Sin embargo, en muchos casos la realidad es bien distinta realizándose quemas incontroladas en el campo, con el consiguiente riesgo de incendio y el despilfarro energético que esto supone.

Actualmente, nos podemos encontrar con materiales lignocelulósicos que son vendidos al cliente para su combustión en equipos domésticos e industriales sin una caracterización previa de los mismos, encontrándonos con productos que no cumplen con los parámetros de porcentaje en humedad, volátiles, cenizas, carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro, etc, dentro del rango establecido por la normativa vigente *UNE PNE-EN 14961-2 sobre Biocombustibles sólidos*.



5. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO.

El fundamento de este trabajo, es el diseño y desarrollo de un proceso de secado para mejora de la caracterización de estos materiales lignocelulósicos del olivar con el fin de obtener un producto de calidad dentro de los parámetros establecidos en el marco de las normas nacionales e internacionales.

En la actualidad el tratamiento que se realiza al hueso de aceituna para su comercialización consiste en el secado natural expuesto al sol o el apilado en naves agrícolas cubiertas donde se produce un almacenamiento de al menos una temporada del producto hasta su comercialización.

Este almacenamiento requiere de una mecanización importante, ya que el producto si es almacenado con un porcentaje de humedad elevado, es necesario moverlo con el fin de eliminar toda actividad microbiana. Esta actividad puede promover junto con la influencia del oxígeno el calentamiento del material, pudiendo llegar a causar la auto-ignición de las pilas de almacenamiento.

Otro de los problemas que nos hemos encontrado, en los procesos actuales para secado, son procesos que son utilizados para el deshidratado de productos lignocelulósicos que contienen un alto grado de humedad, por lo que son procesos que usan gases a altas temperaturas ($>400^{\circ}\text{C}$). Estos procesos no pueden ser usados en productos que contengan un grado de humedad medio bajo como es nuestro caso, ya que produciría un precombustión del producto reduciendo su poder calorífico considerablemente.



Características del producto en estudio.

	Hueso
Análisis inmediato (% peso)	
Carbono	21,98
Volátiles	76,40
Cenizas	1,62
Humedad y materia volátil	13,12
Análisis elemental (% peso)	
Carbono	50,79
Hidrogeno	5,95
Nitrógeno	0,48
Azufre	0,04
Oxigeno	42,74
Poder Calorífico (kcal/kg seco)	
Superior	4800
Inferior	4500

La solución que se ha planteado y que nos ha llevado al diseño de nuestro prototipo se ha desarrollado tras un largo estudio de los procesos de secado utilizados en la actualidad. Se ha considerando las características del material a tratar, densidad, %humedad, % de suciedad, etc. esto nos ha llevado a dirigirnos hacia un proceso de transporte, secado y limpieza de tipo neumático, en el cual en un mismo proceso se realice el secado y limpieza del producto a tratar.



6. ETAPAS DE LA OBTENCIÓN DEL PRODUCTO LIGNOCELULOSICO EN ESTUDIO.

6.1.- PRIMERA ETAPA: PRODUCCIÓN DEL ACEITE DE OLIVA Y ACEITUNAS DE MESA.

La aceituna está compuesta por un 85% de pulpa y un 15% de hueso. Debe diferenciarse entre el hueso generado en las industrias de aderezo de aceituna de mesa y el obtenido en el proceso de obtención de aceite de oliva.

Las industrias de aderezo deshuesan aproximadamente el 80% de la aceituna que procesan para su comercialización sin hueso. Según el *COI* para la campaña 2008-2009 en Andalucía hubo producción de aceituna de mesa de 350.000 *t/año*, esto supone unas 42.000 *t/año* de hueso que se utilizó en calderas para la obtención de energía térmica.

Respecto a la aceituna destinada a obtención de aceite de oliva, el 70% del orujo se deshuesa tras la molturación, mediante un proceso de separación pulpa-hueso, bien en la almazara o bien en la extractora. Según la misma fuente (*COI, 2009*), la producción de aceituna en Andalucía destinada a la obtención de aceite fue de 4,3 *Mt/año*, lo que supone una producción de hueso triturado, en una cantidad de unas 451.500 *t/año*.

En el centro productivo del aceite, la almazara, se puede obtener el aceite mediante dos vías según las instalaciones: vía tradicional, que actualmente, en España, queda de uso restringido en algunas almazaras protegidas como patrimonio, o por vía moderna donde la mecanización del sector ha hecho posible la producción en continuo del aceite, y donde se puede distinguir entre el proceso de extracción de tres fases que se ha ido cambiando con el tiempo por el proceso de dos fases debido a cuestiones medioambientales. En el siguiente esquema se refleja el flujo de las operaciones realizadas durante la extracción del aceite de oliva en los tres procesos.



Figura 7. Diagrama de flujo en los tres procesos de extracción del aceite de oliva.

6.1.1. Proceso Común. Lavado y pesado.

Cuando llegan las aceitunas a la almazara y después de eliminar las hojas mediante ventiladores, se llevan a un tambor rotatorio en el que circula agua y en el que se separan los materiales más pesados y las sustancias extrañas. A continuación se pesan las aceitunas para saber la cantidad limpia aportada por cada agricultor.

En la Figura 8. puede verse una imagen de una pesadora y una lavadora de aceituna como las utilizadas en las almazaras en Andalucía.



Figura 8. Pesadora y lavadora de aceituna.

6.1.2. Sistema Tradicional

Es el proceso donde la separación de la fase líquida de la fase sólida, se hace por presión. Las aceitunas se trituran en molinos, que disponen de 3 o 4 piedras cónicas sobre una base de granito y girando alrededor de un eje con una velocidad de 12-15 r.p.m. Esta operación pretende romper las células de la pulpa para dejar que el aceite salga de las vacuolas permitiendo la formación de gotas más grandes.



Figura 9. Molino de piedras cónicas.



Las aceitunas molidas pasan a la batidora para agitarse lentamente con objeto de aumentar el tamaño de las gotas de aceite para una separación más fácil de otras fases. Esta operación dura de 10 a 20 minutos.

La extracción se realiza mediante prensas, este método se considera el más antiguo y consiste en la aplicación de presión a una pila de discos filtrantes, entre cada dos de ellos se dispone una capa de pasta de aceituna. Luego todo ello se coloca sobre un carro que lleva un eje central. La presión aplicada se encuentra entre 120-200 kg/cm² durante 1 a 1,5 horas.

Después del prensado la fase sólida se retira mediante tamiz vibratorio, y mediante la decantación, por diferencia de densidades, se separan los dos constituyentes de la fase líquida, quedando abajo el agua de vegetación de mayor densidad (1,01 kg/l) y arriba el aceite con menos densidad (0,91 kg/l).



Figura 10. Prensa hidráulica para la extracción de aceite



6.1.3. Sistema moderno - Proceso de dos y tres fases.

Se denominan sistemas continuos porque el proceso tradicional la prensa tiene que parar para descargarse y cargarse de nuevo. En el proceso continuo la centrífuga no para de ser alimentada, por un extremo entra la masa de aceituna y por el otro sale el aceite y los subproductos.

La diferencia entre un proceso de dos fases y el de tres fases está en el tratamiento de centrifugación, operando de la misma manera en el resto de las etapas.

Molienda: se emplean molinos metálicos (martillo, disco) donde es posible fijar el tamaño de las partículas salientes. Tienen la ventaja de un elevado rendimiento y ocupan menos espacio que los molinos de piedra.



Figura 11. Molino de martillo para molienda de aceituna.

Batido: Para eliminar las emulsiones de aceite y agua formadas durante la molienda, se realiza el batido para aumentar el tamaño de las gotas de aceite durante un tiempo que no supera una hora. Las batidoras consisten generalmente en cubas horizontales semicilíndricas que dispone de una cámara exterior para la circulación del agua caliente y un interior donde la mezcla de la pasta de aceituna se realiza mediante paletas giratorias. Para optimizar el proceso se aporta calor siendo el intervalo 30-35°C como el más eficiente para la calidad del aceite y se añaden agua y coadyuvantes tecnológicos



de filtración como el talco. Estas últimas están siendo cuestionadas en algunos foros en el ámbito europeo debido a la contradicción con la definición de aceite de oliva virgen, ya que se introducen procesos biotecnológicos y no puramente físicos como ésta descrito en la definición de aceite virgen (*Pardo, 2002*).



Figura 12. Batidora de aceituna

Centrifugación de la pasta: Para la separación del aceite contenido en la pasta de aceituna se utiliza un centrifugadora horizontal o decánter. Este proceso consiste en la separación de la fase sólida y de la fase líquida de la masa de aceituna procedente de la batidora. El proceso se basada en la diferencia de densidades de los constituyentes de la masa y de la aplicación de la fuerza centrífuga.

La centrífuga horizontal o decánter de dos salidas, tiene un rotor cilíndrico-cónico y un tornillo sinfín hueco, que gira coaxialmente en el interior del mismo. La masa es introducida por el tornillo sinfín en medio de decánter, por lo que el rotor al girar hace que los sólidos con el agua y algo de aceite ocupen el diámetro mayor del cilindro, mientras que el aceite con algo de agua y sólidos ocupen el menor diámetro. El tornillo sinfín de eje hueco gira distinta velocidad, pero en el mismo sentido que el rotor, arrastrando la parte más pesada al extremo del decánter, por donde saldrá por un orificio situado en el extremo del mismo, mientras que la parte menos densa de la masa (aceite y algo de agua y sólidos), es evacuada por el otro extremo del decánter que se encuentra próximo al eje.



La diferencia entre el proceso de dos salidas y tres salidas es básicamente en la centrífuga horizontal o decánter. En el sistema de tres salidas se añade agua a la masa que viene de la batidora, teniendo dos fases en la parte líquida (agua y aceite) y una fase en la sólida. En el sistema de dos salidas se realiza sin añadir agua a la pasta que viene de la batidora, por lo que solo hay una fase en la parte líquida y una fase en la sólida: aceite y orujo húmedo. Los decantadores de dos salidas salieron por primera vez al mercado a principio de la década de 1990 para eliminar vertidos líquidos. En la Figura 13, se puede ver un decánter de 3 salidas y en la Figura 12 un de dos salidas.

La calidad de aceite producido por el sistema de dos salidas es superior a la obtenida en el proceso de tres salidas. Esto es debido a la mayor concentración de polifenoles y o-difenoles que se produce con el nuevo sistema, lo que da más estabilidad durante el almacenamiento, siendo esta calidad similar a la obtenida por el sistema clásico de presión en el aspecto del contenido en polifenoles (AMA, 1994).

En la actualidad las centrifugadoras de dos salidas son capaces de agotar la pasta hasta un intervalo comprendido entre el 3-6 % de aceite. Estos porcentajes son los que contendrá el alperujo de 2 salidas. En los años de poca producción o en momentos de la campaña donde la producción de entrada diaria está por debajo de la entrada media, el orujo húmedo se suele someter a un proceso de repaso. Este proceso consiste en una segunda extracción de aceite tras reintroducirlo de nuevo en la batidora, en este segundo repaso el orujo húmedo puede llegar a quedar entre 1,5-3% de aceite.

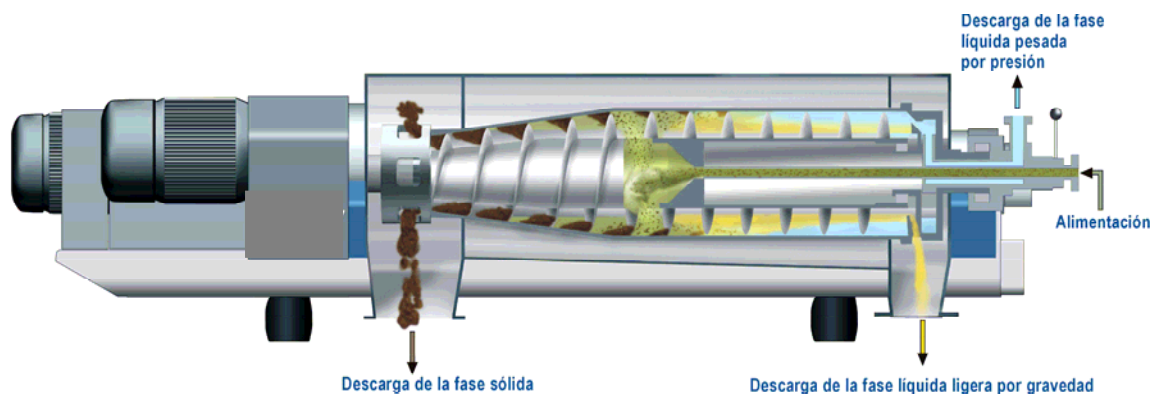


Figura 13. Decánter de 3 salidas.

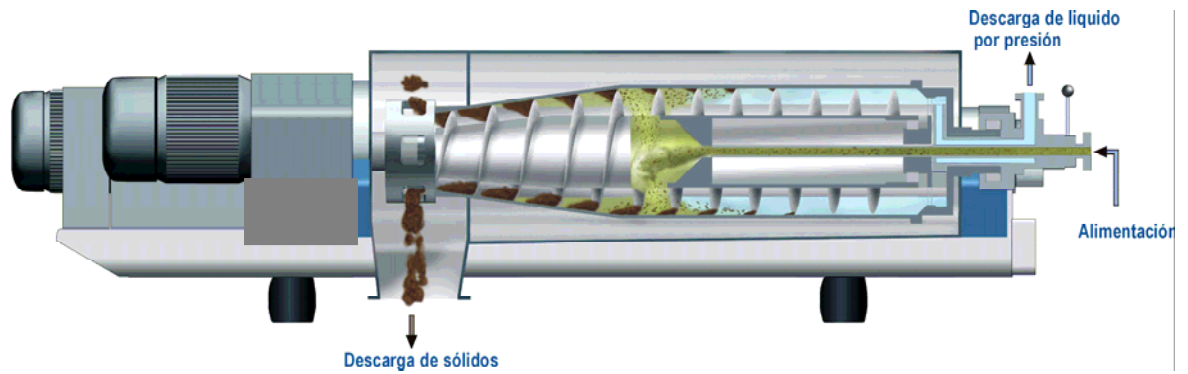


Figura 14. Decánter de 2 salidas .

El aceite obtenido en el decánter es recogido en un tamiz vibrador con bandeja de acero inoxidable, provisto de un cajón que sirve de depósito de aceite que retendrá las partículas sólidas gruesas que contenga, a continuación será bombeado hacia la centrífuga vertical por una bomba volumétrica de tipo salomónico con válvula antiretorno. En la figura 15, se puede ver la sección de una centrifugadora vertical de rotor de platillos.

Después de la centrifugación, las almazaras suelen disponer de decantadores para eliminar parte del agua y pulpa que aún quedan, más densos, y que se acumulan en el fondo.

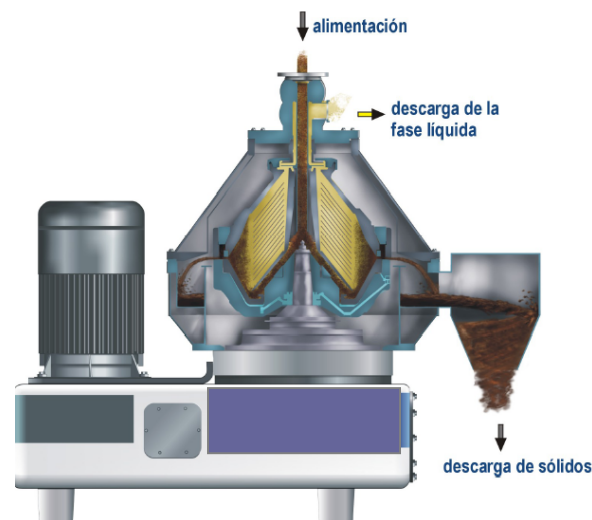


Figura 15. Centrífuga vertical para el lavado del aceite.



Aclarado: Antes de mandar el aceite a la bodega este debe reposar un mínimo de 24 horas en los aclaradores, que son unos depósitos de acero inoxidable. Esta operación tiene dos objetivos:

- Eliminar las posibles impurezas contenidas en el aceite tras la salida de la centrífuga vertical.
- Expulsar el aire y reducir de este modo la concentración de oxígeno que el aceite lleva disuelto después del movimiento que le han transmitido los equipos de extracción.

El no realizar este proceso supone una mayor oxidación del aceite y un progresivo deterioro de la calidad en la bodega.

Almacenamiento: El aceite, que se produce durante 3 y 4 meses de campaña, se consume a lo largo del año, por lo que su almacenamiento es necesario. Debe conservarse en unas condiciones que no alteren ni sus características organolépticas ni su calidad nutritiva. Para ello actualmente se utilizan depósitos de acero inoxidable de unos 50.000 kg, con control de temperatura, luz y humedad donde el aceite se almacena en mejores condiciones evitando su oxidación. En la Figura 16, se puede ver los depósitos de la bodega una almazara.



Figura 16. Bodega de una almazara con depósitos de acero inoxidable.



Filtración: Antes del envasado hay aceites que se someten a un proceso de filtración y otros que no; se recomienda no filtrar si el envasado se hace en volúmenes de menos de 5 litros y si el aceite se consume en poco tiempo. Cuando se realiza la filtración se utilizan filtros formados por una pasta de celulosa y tierra de diatomeas que eliminan la humedad y las impurezas dando brillo al aceite de oliva virgen.

Envasado: Consiste en introducir el aceite en las botellas, pudiendo realizarse de forma manual o automática. El volumen del llenado de la botella no será nunca inferior al 90 por 100 de la capacidad del mismo (*Pardo, 2003*).

6.1.4. Industria de las aceitunas de mesa.

Existen distintas variedades que se destinan a la elaboración de aceitunas de mesa como ‘*Manzanilla Sevillana*’, que es la variedad más difundida internacionalmente debido a su productividad y la calidad del fruto, ‘*Gordal*’, ‘*Hojiblanca*’, ‘*Cacereña*’ y ‘*Verdial*’. En todos los casos, el fruto debe tener un buen tamaño, un excelente sabor, una buena relación pulpa/hueso y un deshuesado fácil.

Hay muchas maneras de preparar las aceitunas de mesa pero en general se puede distinguir entre aceitunas aderezadas, sin aderezar o al natural.

El proceso de aderezo de la aceituna se desarrolla según la siguiente secuencia (*Fernández y Garrido et al, 1985*): recolección, transporte, escogido o clasificación, tratamiento con lejía, lavados, colocación en salmuera, fermentación, clasificación, deshuesado opcional y finalmente envasado.

En este proceso los frutos que son de color verde a verde amarillento, se transportan a las plantas de aderezo y después de ser escogidos y parcialmente clasificados, se tratan con una solución diluida de hidróxido sódico, *operación denominada cocido*, para eliminar el amargor; seguidamente, los frutos se lavan varias veces con agua en periodos variables de tiempo, para eliminar el exceso de lejía. Finalmente se colocan en una salmuera donde sufren una fermentación láctica de



duración variable. Los frutos, una vez fermentados, se seleccionan y se clasifican por tamaños para ser envasados como enteros, deshuesados, o rellenos con diversos ingredientes.

Para las aceitunas de color negro, una vez recolectado y transportado, se lavan, se escogen y se almacenan en salmuera o solución ácida, después de un segundo escogido y separación por tamaño pasan a la fase de ennegrecimiento que consiste en un tratamiento de lejía y una oxidación con aire seguidos de múltiples lavados y una fijación de color. Finalmente las aceitunas se encuentran preparadas para el deshuesado, esterilización y envasado.

6.2.- SEGUNDA ETAPA. GENERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN AMBAS INDUSTRIAS.

Los residuos generados pueden ser de dos tipos líquidos o sólidos.

6.2.1.- Residuos líquidos

Agua de lavado de aceituna: Es el agua de vegetación de la aceituna, es de color rojizo oscuro, contiene en suspensión restos de tejidos blandos, pectinas, aceite, todo en forma de emulsión relativamente estable (Martínez Nieto, 1993), con unas características que dependen de las condiciones edáficas del suelo, clima, variedad, cultivo, época y manera de recolección.

Alpechín: El alpechín es un líquido oscuro y fétido que se obtiene al presionar o centrifugar la pasta de aceituna molturada previamente en las almazaras

Dependiendo de la almazara y del sistema de extracción (sistema 3 o 2 salidas), si tiene un sistema de 3 salidas obtiene primero orujo, que es la mezcla de hueso de aceituna, piel y pulpa, reutilizable; y después un líquido en dos fases que contiene alpechín y el aceite de oliva, que es separado mediante decantación o centrifugación. Si la almazara



es de dos salidas, por un lado se obtiene aceite y por otro una pasta de orujo húmedo, que contiene una mezcla de orujo y alpechín.

El sistema de dos salidas es denominado también sistema ecológico debido al ahorro que se obtiene en su proceso, entre un 60 a 70 por 100 de agua, respecto al sistema de 3 salidas utilizado.

Agua de la fase de extracción de aceite en el sistema de dos salidas: tiene una composición similar a los alpechines pero con menos concentración, ya que gran parte de los compuestos se quedaron en los orujos.

Se han probado varias vías de eliminación y de tratamiento de estos efluentes, entre las cuales se encuentran su aplicación directa como fertilizantes, pero resulta un generador de otros problemas como contaminación de aguas subterráneas, malos olores, y una degradación lenta. También se ha empleado en fabricación de pienso pero tiene un contenido bajo en proteínas y una alta concentración en celulosa, además otro problema añadido es su tratamiento a nivel de depuradoras de aguas residuales puesto que plantea el problema de su alto contenido en materia orgánica (20.000 – 40.000 mg/L frente a la carga de aguas residuales urbanas entre 400-800 mg/L), debido al contenido alto en polifenoles, esta agua se degrada muy mal por los procesos biológicos (*Maestro et al, 1991*); aun así la generación de biogás, compostaje o fermentación son otras vías de tratamiento biológico que se han ensayado con más o menos éxito.

6.2.2.- Residuos sólidos de ambas industrias.

La definición de la **biomasa** según la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 y la asociación española de la Normalización y Certificación AENOR es: todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización.

Otras definiciones reducen el concepto de biomasa a toda materia de origen biológico que puede ser convertida en energía.



En la Tabla 2 se resumen los diferentes tipos de biomasa que pueden ser de tipo natural o residual como los residuos de agricultura, forestales y sus industrias.

Tabla 2. Tipo de biomasa

Biomasa Natural	Biomasa Residual	Biomasa Energética
Disponible en ecosistemas	Residuos de actividades agrícolas: Podas de olivar	Cultivos con fin de producción de energía: biocarburantes, energía térmica o eléctrica. - Semilla - Biomasa lignocelulósica: hueso de aceituna.
	Residuos de aprovechamiento e industria s forestales	
	Residuos de industrias agrícolas: Orujo, Orujillo, Hueso de aceituna.	
	RSU y de procesos de residuos biodegradables para producción de biogás	
	Aserrín prensado: Pellets de aserrín y Pellets de poda de olivo.	

Según las definiciones de biomasa, todos los subproductos sólidos que se generan en la industria de la aceituna están constituidos por *biomasa*, cuya clasificación se define a continuación:

- Industria de aderezo: genera como residuo sólido el hueso de aceituna entero cuyo aprovechamiento se describirá más adelante.
- Industria de extracción de aceite de oliva: genera unas cantidades grandes y variables de residuos sólidos que están constituidos por el orujo y del que se pueden separar la pulpa y el hueso triturado.
- En ambas industrias: se producen residuos concentrados, los residuos dispersos como hojas y ramones que acompaña a las aceitunas en el proceso de



recolección y que se elimina previamente al lavado de aceituna en la entrada de las almazaras y que pueden ser quemadas o aprovechadas en otros fines.

Orujo: Es el residuo sólido generado durante la molturación de las aceitunas por el sistema continuo de tres fases, conteniendo la pulpa y el hueso de aceituna (contenido de un 50% humedad)

Orujo Húmedo: Es un residuo semi-sólido generado durante la molturación de las aceitunas por el sistema continuo de dos salidas, resultante de la mezcla de hueso, resto de pulpa y agua de vegetación. Este subproducto tiene una elevada humedad, entorno al 70%.

El aprovechamiento de ambos materiales consiste en pasarlo por una separadora de pulpa y hueso, después la pulpa es llevada a una extractora donde se obtiene el aceite de orujo de oliva denominado de repaso, generando de nuevo alpechín y orujo con un 50% de humedad, este orujo pasará a un secadero en el que el porcentaje de la humedad pasará al 12% obteniendo orujillo (orujo seco) que se vende como combustible.

La ventaja del uso de estos residuos como combustible se debe a su poder calorífico, al bajo impacto desde el punto de vista de las emisiones gaseosas de CO₂ (no supera el 0,14% en todos los residuos) y a su coste económico, actualmente beneficiado por el protocolo de Kyoto.

Hueso de Aceituna: El hueso de aceituna es uno de los residuos sólidos más importantes que genera la industria del olivar tanto la de aderezo como la de extracción de aceite, por lo que se han encontrado algunas vías de aprovechamiento debido a sus grandes volúmenes de generación.

Una análisis previo nos permite elaborar una composición del contenido del hueso de aceituna con el resto de residuos sólidos de olivar. En la Tabla 3, se puede ver una



comparación de la composición del hueso con respecto al resto de los residuos sólidos del olivar

Tabla 3. Comparación del contenido del hueso con el resto de residuos sólidos del olivar. Fuente: OPET 2002.

	Poda de olivar	Orujo	Orujillo	Hueso
Análisis inmediato (% peso)				
Carbono	14,67	7,31	22,13	21,98
Volátiles	72,83	30,65	72,29	76,40
Cenizas	1,55	6,75	4,58	1,62
Humedad y materia volátil	10,95	55,29	12,69	13,12
Análisis elemental (% peso)				
Carbono	49,52	47,03	50,54	50,79
Hidrogeno	5,9	5,64	5,86	5,95
Nitrógeno	0,39	0,97	0,97	0,48
Azufre	<0,05	0,09	0,07	0,04
Oxigeno	44,19	46,27	42,56	42,74
Poder Calorífico (Kcal/kg seco)				
Superior	4600	4500	4500	4800
Inferior	4300	4250	4300	4500

Teniendo en cuenta el elevado porcentaje que representa el hueso con respecto al total del fruto (entre 18 y 23%) su aprovechamiento ha despertado la atención de numerosos investigadores en los últimos años.



Desde hace tiempo, la composición química del hueso de aceituna ha sido objeto de investigación; se ha realizado estudios sobre su grasa (*Mingo et al, 1953*), proteínas (*Fernández et al, 1961*), azúcares, polifenoles y oligosacáridos (*Rivas et al, 1983*) y contenido en celulosa, hemicelulosa y lignina del mismo (*Heredia et al, 1983*), estudio de productos finales de una autohidrólisis del hueso (*Cuevas et al, 2009*).

En las almazaras, tanto en las de dos fases como las de tres fases, una vez se ha generado la fracción sólida de los residuos después de la centrifugación, tanto el orujo como el alperujo pasan por unas nuevas máquinas llamadas separadoras de hueso y pulpa o comúnmente deshuesadoras.

El proceso de deshuesado que se produce a la salida del sistema en continuo y son alimentadas mediante bombas elevadoras de residuos. Después de la separación del hueso, éste se acumula en tolvas o amontonado en una superficie de la propia almazara esperando su venta o su aprovechamiento.

En la Figura 17, se puede ver la imagen de una deshuesadora utilizada en las almazaras de Andalucía.



Figura. 17. Modelo de separadora de hueso de aceituna.



Entre las distintas vías de aprovechamiento del hueso de aceituna, tanto el triturado como el entero, podemos destacar la dedicada a producir energía térmica y electricidad.

Sabiendo que 1 kg de hueso de aceituna, con una humedad de 9,3% tiene un poder energético de 5,16 Kwh, 2 kg de hueso de aceituna tienen un poder calorífico equivalente a un litro de gasóleo o 1 Nm³ de gas natural. Esto le convierte a una biomasa muy cotizada en la actualidad debido también a su homogeneidad y a su bajo efecto a la hora de evaluar las emisiones.

Existen otros usos a los que se le da aplicación también el hueso de aceituna en la industria, como pueden ser usarlo como absorbente después de someterlo a un proceso de carbonización, consiguiendo aumentar su superficie y su porosidad en general. Este hueso de aceituna también se puede activar después de carbonizarlo consiguiendo lo que se denomina carbón activo.

Otras aplicaciones del hueso fueron la que se desarrolló en la industria del queso, utilizando el polvo mezclado con otros polímeros para recubrimiento de los quesos.



7. REVISIÓN DE CONOCIMIENTOS EN PROCESOS DE SECADO.

Según pruebas realizadas al nivel de humedad contenido en el hueso de aceituna triturado de las almazaras, el porcentaje de humedad presente en el hueso de aceituna varía desde un 20% de un hueso almacenado en cubierto a humedad ambiente, hasta un 33% de un hueso almacenado a la intemperie en los patios de la almazara.

El objetivo principal de esta etapa es, precisamente, el de realizar de forma *instantánea y en continuo*, la disminución de la humedad contenida en el hueso en el estado que sale de la almazara, máximo un 33%, hasta un nivel de equilibrio del material un 10%, *humedad optima* para la combustión de esta biomasa en calderas y estufas.

Para el secado se ha optado por la revisión de todos los equipos utilizados para otros materiales, se ha estudiado la tecnología utilizada para diseñar un sistema de secado adaptado al material que se trata en este estudio. Uno de los principales condicionantes, aparte de los indicados anteriormente, ha sido el nivel de humedad a eliminar a esta materia prima comprendido entre 20-33%, para lo cual se ha estudiado realizar con temperatura entorno a los (<200°C), haciendo revisión de conocimientos en la industria los equipos que se han encontrado son equipos que usas gases a muy altas temperaturas (>400°C), a esta temperatura el material comienza un proceso exotérmico en el que se liberan sus volátiles que arden, deteriorando bastante sus propiedades caloríficas finales.

El objetivo principal de nuestro trabajo es el de considerar que tipo de secadero sería el apropiado para el rango de humedad que se trata de eliminar, que en este caso sería entre el 30% y el 10 %.



Hay varias maneras de clasificar los equipos de secado. Las dos clasificaciones más útiles se basan en:

- El método de transferencia de calor a los sólidos húmedos.
- Las características de manejo y las propiedades físicas del material húmedo..

El primer método de clasificación revela las diferencias en el diseño y el funcionamiento del secado, mientras que el segundo es más útil para seleccionar entre un grupo de secadores que se someten a una consideración preliminar en relación con un problema de secado específico.

7.1. TIPOS DE SECADORES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA.

A continuación se va realiza una clasificación de los tipos de secadores que se utilizan para dar un producto sólido seco partiendo de una alimentación húmeda:

7.1.1.- Secadores directos.

Son aquellos donde la transferencia de calor para la desecación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. La fase líquida vaporizada se arrastra con el medio de calefacción; es decir, con los gases calientes. Los secadores directos se llaman también secadores por convección (*Perry, 1992 McGraw-Hill*).

Los secadores directos se pueden clasificar en dos tipos:

7.1.1.1.- Secadores directos continuos.

Son aquellos donde la operación es continua, en tanto se suministra la alimentación húmeda. Es evidente que cualquier secadero continuo puede funcionar en forma intermitente o por lotes, si así se desea.

Tipos de secadores directos continuos:



- a) **De bandeja:** Como los de bandejas metálicas continuas, de bandejas vibradoras que emplean gases calientes, los turbo secadores verticales.
- b) **De material dosificado en una capa:** Se hace pasar por el secadero una capa o láminas continua de material, en una lámina tensa y distendida sobre un marco con clavijas.
- c) **De transportador neumático:** En este tipo, la desecación se realiza a menudo en combinación con la trituración. El material se transporta dentro de gases a alta temperatura y velocidades elevadas hasta un colector de ciclón.
- d) **Rotatorios:** El material se transporta y rocía dentro de un cilindro rotatorio por el que circulan gases calientes.
- e) **Neumático y por aspersión:** La alimentación del secador debe poderse atomizar ya sea mediante un disco centrífugo o una boquilla.
- f) **De circulación directa:** El material se mantiene en un tamiz de transporte continuo, mientras se sopla aire caliente a través de él.
- g) **De túnel:** El material colocado en carretillas se desplaza a través de un túnel en contacto con gases calientes.
- h) **Lechos fluidos:** Los sólidos se fluidifican en un tanque estacionario. También pueden tener serpentines de calor indirecto.

7.1.1.2.- Secadores directos discontinuos.

Son los secadores que se diseñan para operar con un tamaño específico de lote de alimentación húmeda, para ciclos de tiempo dados. En los secadores por lotes o discontinuos las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo.

Tipos de secadores directos discontinuos:

- a) **De circulación directa:** El material se coloca en bandejas con base tamiz a través de las cuales se sopla aire caliente.
- b) **De bandejas y compartimentos:** El material se coloca en bandejas que pueden o no montarse en carretillas movibles. El aire se sopla sobre el material contenido en las bandejas.



- c) **Lechos fluidos:** Los sólidos se fluidifican en un carro estacionario sobre el cual va montado un filtro de polvo.

7.1.2.- Secadores indirectos.

El calor se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. La fase líquida vaporizada se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material húmedo y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto (*Perry, 1992 McGraw-Hill*).

Tipos de secadores indirectos:

7.1.2.1.- Secadores indirectos continuos.

La desecación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secadero y poniéndolo en contacto con las superficies calientes.

Tipos de secadores indirectos continuos:

- a) **De cilindro:** Para hojas continuas, como papel, celofán, piezas textiles. Por lo común, los cilindros se calientan con vapor y son rotatorios.
- b) **De tambor:** Estos se pueden calentar con vapor o agua caliente.
- c) **De transportador de tornillo:** Aunque estos aparatos son continuos pueden funcionar al vacío. También es posible recuperar disolventes durante la desecación.
- d) **Rotatorios de tubo de vapor:** Se puede utilizar vapor o agua caliente. Es factible operar con una ligera presión negativa para permitir recuperar el disolvente durante el desecado, si así se desea.
- e) **De bandejas vibradoras:** El calentamiento se logra con vapor o agua caliente.
- f) **Tipos especiales:** Como bandas de tejido continuas que se mueven en contacto estrecho con una platina calentada al vapor. El material que se va a secar reposa sobre la banda y recibe el calor por contacto.



7.1.2.2.- Secadores indirectos discontinuos.

En general, los secadores indirectos por lotes se adaptan muy bien a operaciones al vacío. Se subdividen en tipos agitados y no agitados.

Tipos de secadores indirectos continuos.

- a) **De artesas agitados:** Estos pueden operar atmosféricamente o al vacío, y manejan una producción pequeña de casi cualquier forma de sólidos húmedos, es decir, líquidos, lechadas, pastas o sólidos granulares.
- b) **Por congelación:** El material se congela antes de desecarse. A continuación se efectúa la desecación en ese estado, al alto vacío.
- c) **Rotatorios al vacío:** El material se agita bajo una cubierta horizontal estacionaria. No siempre es necesario aplicar vacío. El agitador se puede calentar con vapor además de hacer lo mismo con la cubierta.
- d) **De bandejas al vacío:** El calentamiento se hace por contacto con parrillas calentadas con vapor o agua caliente, sobre las cuales se coloca el material. No interviene la agitación.

7.1.3.- Secadores de infrarrojos o de calor radiante.

La desecación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secadero, y poniéndolo en contacto con las superficies calientes.

7.2.- JUSTIFICACIÓN DEL EQUIPO SELECCIONADO.

La selección del tipo de secadero se ha realizado considerando que la operación de secado se puede realizar a temperaturas bajas, menores a 250°C, de esta forma el tipo de secadero es muy apropiado para materiales pulverulentos con humedades inferiores al 35%, características que presentan los materiales lignocelulósicos estudiados que se quieren tratar.

Para el diseño del equipo de secado, han influido varios puntos a tener en cuenta:

- El proceso ha de ser a baja temperatura (<200°C), debido a las características del material y al poco nivel de humedad contenido en el material.



- El proceso debe ser realizado de forma instantánea para su óptima comercialización
- En el mismo proceso deben ser eliminados la sílice, la pulpa y los despojos de la molturación de la aceituna contenidos en el hueso procedente de la extracción.
- El proceso debe ser un proceso donde el gasto energético sea mínimo, debido a la repercusión que este debe tener en el precio del biocombustible.

El proceso de secado utilizado es un tipo:

“Secador directo de alimentación continua de tipo neumático y por aspersion.”



8. DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DEL EQUIPO SELECCIONADO.

8.1.- INTRODUCCIÓN AL EQUIPO SELECCIONADO.

Se puede denominar como sistema neumático aquel sistema en el cual el gas y las partículas sólidas están diluidas y en continuo contacto dentro del propio gas (*Perry, 1992 McGraw-Hill*).

Los sistemas neumáticos se distinguen por dos características principales:

- 1.º Las partículas de los sólidos deberán ser muy pequeñas para que la transferencia de calor y la transferencia de masa desde los interiores sea fundamentalmente instantáneas.
- 2.º El sistema se encuentra equilibrado en todo momento, ya que existe la suficiente energía en el gas presente en el sistema en cualquier instante determinado para completar el trabajo en todos los sólidos presente en dicho instante.

En este sistema neumático, la circulación del gas y los sólidos es de *corriente paralela*, aunque se encuentra una excepción en el secador por rocío de flujo a contracorriente.

Por estas razones, el equipo neumático es muy apropiado para procesar materiales sensibles al calor, fácilmente oxidables, explosivos o inflamables que no se puedan exponer durante largos periodos de tiempo a las condiciones del proceso, teniendo un muy buen funcionamiento con equipos por lotes o de proceso continuo.

En el secado por transporte neumático se lleva a cabo una transferencia simultánea de masa y calor, esta última es principalmente por convección forzada. La operación se realiza exponiendo un material sólido húmedo a cualquier gas o mezcla de gases calientes, no saturados con el líquido que va a evaporarse del sólido. Con base a lo anterior es importante seleccionar una mezcla de gases calientes, lo más compatible posible con el líquido que va a evaporarse del sólido.



El mecanismo de secado se realiza por la transferencia de calor sensible por parte del gas caliente al sólido húmedo; el agua del sólido, es evaporada y arrastrada en conjunto con el gas o mezcla de gases calientes por medio de un proceso de transferencia de masa. La velocidad de los gases calientes que salen del quemador y que circulan a través del conducto del transporte neumático llevan una velocidad tal que fluidizan e incrementan el área superficial de las partículas sólidas, para finalmente transportarlas. La velocidad mínima en la cual inicia el transporte de las partículas sólidas se conoce como '*velocidad terminal*', pero la velocidad a utilizar debe ser mucho mayor. Las mezclas de partículas sólidas ya fluidizadas se dispersan libremente en el gas de transporte y son secadas a alta velocidad.

Los gases calientes salen del secador a una temperatura menor, debido al calor sensible cedido: primero cedidos al sólido húmedo alimentado, con el fin de incrementar su temperatura y evaporar el líquido del sólido y segundo al medio ambiente o exterior del equipo como pérdida de calor.

Es importante hacer notar que los gases de salida ven incrementada su humedad relativa al salir del equipo, debido a la evaporación de agua del sólido. Lo anterior representa una limitación en la recuperación total de la energía disponible en estos gases en el mismo proceso, ya que no es posible la recirculación de los gases debido a que en su estado de humedad ya no secarían más.

El tiempo de contacto o residencia del gas caliente con las partículas sólidas húmedas es de unos cuantos segundos, lo cual limita la técnica a los casos en los que se tiene exclusivamente *humedad superficial*, y en donde no se presentan procesos difusionales hacia el interior de las partículas sólidas.

8.2.- SECADORERO DE TRANSPORTADOR NEUMÁTICO.

Un secadero de transportador neumático consta de un tubo o conducto largo que lleva un gas con alta velocidad, un ventilador para impulsar, un dosificador apropiado para agregar y



dispersar los sólidos en pequeñas partículas en la corriente del gas y un colector de ciclón u otro equipo de separación para la recuperación final de los sólidos del gas.

Se pueden utilizar varias clases de alimentadores de sólidos; los de tornillo sin fin, los de secciones tipo venturi, los trituradores de alta velocidad y los molinos de dispersión, etc.

Para transportadores neumáticos, la elección del alimentador correcto asegura una minuciosa dispersión inicial de los sólidos en el gas, constituyendo un factor de primordial importancia. Por ejemplo, si se emplea un molino de martillos con barrido siempre en una operación de desecación, se puede transmitir del 65 al 85 del calor total dentro del molino mismo si todo el gas desecante se hace pasar por él.

Los ventiladores utilizados en este tipo de transportadores, pueden ser de tiro inducido o forzado. Casi siempre se prefiere utilizar los primeros, porque el sistema atribuye entonces ser operado con una leve presión negativa.

El polvo y el aire caliente no deben escapar por las fugas del equipo. Se prefiere utilizar los separadores de tipo ciclón para lograr una inversión menor. Si es obligatoria una recuperación máxima de polvo o humos perjudiciales, al ciclón debe seguir un lavador o depurador por vías húmedas, o bien, un recolector de bolsa.

En recuperaciones comunes de calentamiento y enfriamiento durante los cuales no hay alguna captación de humedad, se emplea con frecuencia la recirculación continua del gas portador. Del mismo modo, las operaciones de recuperación de disolventes emplean un gas inerte que recircula en forma continua, con intercondensadores y recalentadores del gas desarrollando tales operaciones en transportadores neumáticos.

Los transportadores neumáticos son apropiados para materiales granulados y de movimiento libre cuando se encuentran dispersos en la corriente de gas, de manera que no se adhieren a las paredes del transportador ni se aglomeran. Los materiales pegajosos, como los



conglomerados o tortas de filtro, se manejan en muchos casos dispersándolos y desecándolos parcialmente en un desintegrador con barrido de aire.

De otra manera, el producto seco se recicla, se mezcla con material de alimentación fresco y luego se dispersa en forma combinada en un desintegrador. El material grueso o áspero que contiene humedad interna se somete a una trituración fina en un molino de martillos. El requisito principal en todas las aplicaciones es, que la operación se debe completar en forma instantánea; la difusión interna de la humedad no debe ser un factor limitante en las operaciones de desecación, y los tamaños de partícula serán lo suficientemente pequeños para que la conductividad térmica de los sólidos no sea la que ejerza el control durante las operaciones de calentamiento y enfriamiento.

Los transportadores neumáticos rara vez son apropiados para sólidos abrasivos, y esta clase de transporte está en condiciones de generar una reducción importante en el tamaño de las partículas, sobre todo cuando se manejan materiales cristalinos o frágiles. Puede ser que ésta sea una característica deseable o indeseable, pero se puede tomar en cuenta siempre que se elija este sistema. Su acción es similar a la de un triturador de energía de fluido.

Los transportadores neumáticos pueden contar con una o varias etapas que los caracterizan:

- Sirve para evaporar cantidades pequeñas de humedad superficial.
- Las instalaciones de etapas múltiples se utilizan en procesos difíciles de desecación, como el desecado de productos sensibles al calor que tienen grandes cantidades de humedad tanto interna como superficial.

En la Figura 18 se muestra un secador de dos etapas que emplea un mezclador de paletas, un reciclaje y un molino de jaula para la trituración fina y la dispersión del material mixto de alimentación en la corriente de aire. Estas unidades están diseñadas para manejar conglomerados de filtro o centrífuga y otros materiales pegajosos o pastosos.

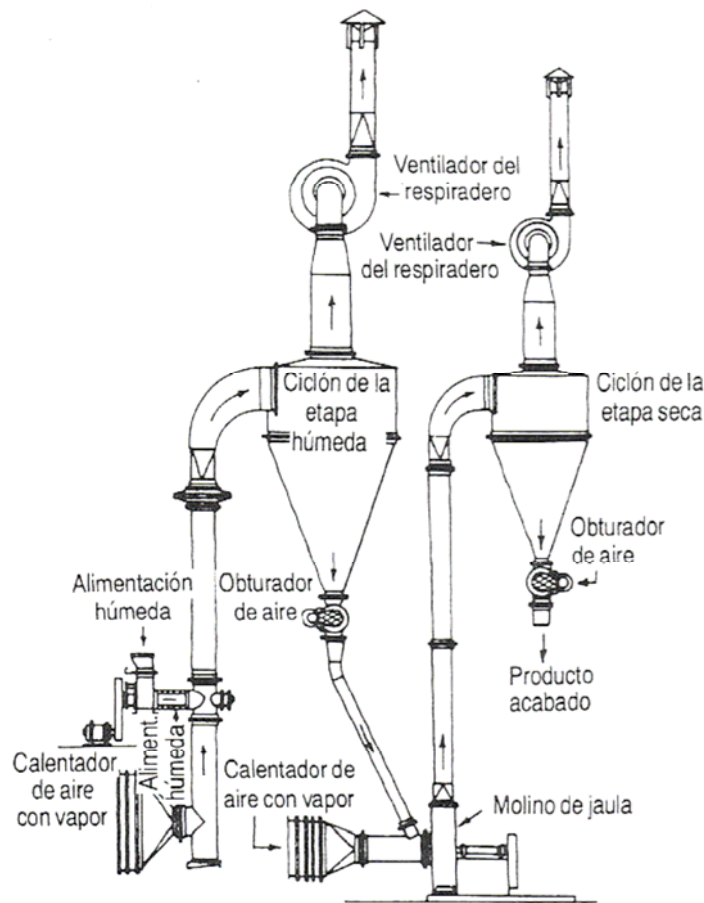


Figura. 18. Secador de transportador neumático de dos etapas, con corriente de aire y molino de jaula.

8.3. MARCO TEÓRICO

El recorrido que efectúa el aire por el secador por transporte neumático es el siguiente; el aire entra a la cámara de secado donde es calentado, posteriormente entra en contacto con los sólidos y los arrastra hasta el colector ciclónico. Debido a la evaporación del agua en el sólido, la temperatura del aire se ve disminuida a lo largo del recorrido. Si la tubería se encuentra bien aislada, las pérdidas de calor con los alrededores puede ser despreciable y por lo tanto la temperatura irá disminuyendo siguiendo la recta de enfriamiento adiabática en la carta de humedad. La evaporación máxima posible para un flujo dado de aire se obtiene cuando el aire a la salida logra alcanzar su estado de saturación.



Esto no ocurre en la práctica, hay casos en los cuales los sólidos se encuentran muy húmedos alcanzando el aire de salida casi la saturación. La humedad relativa es baja a la salida del secador.

Las variables que van a afectar el consumo de energía calorífica dentro de un secador neumático son las enumeradas a continuación:

Temperatura de Alimentación del Aire. El incremento de esta variable produce una disminución en los requerimientos de calor por parte del secador para un flujo dado.

Flujo de Sólidos. Para lograr una óptima utilización del calor se requiere alimentar el máximo flujo posible de sólidos. Esto se debe a que el calor requerido para evaporar una cantidad dada de agua es virtualmente la misma sin importar la cantidad de producto que se obtiene a la salida (calor necesario para calentar el producto es muy pequeño comparado con el requerido para la evaporación). Por lo tanto, un incremento en el flujo de salida para una capacidad evaporativa dada nos producirá un incremento en la alimentación de sólidos. Esto nos muestra que se va a requerir menor cantidad de calor para producir una unidad de sólido seco ya que el aprovechamiento del calor suministrado será mucho más eficiente que si el flujo de sólidos es menor.

Diferencial de Temperatura en el Aire. A mayor diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del aire, menor será el requerimiento de calor para producir una unidad de producto con una humedad constante (suponiendo que el flujo de sólidos permanece constante). Se puede obtener un mayor ΔT incrementando la temperatura de entrada (por medio de un mayor calentamiento al aire). No obstante, también puede obtenerse disminuyendo la temperatura de salida pero esto ocasionará que el sólido saliera con mayor contenido de humedad, requiriéndose dos etapas de calentamiento.

Temperatura de Sólidos de Alimentación. Un aumento en esta variable reduce el calor requerido para producir una unidad de sólidos secos. El precalentamiento de los sólidos normalmente es utilizado para reducir su viscosidad y por lo tanto la atomización dentro del secador sea mejor, o bien para prevenir la cristalización que



podiera ocasionar el manejo de partículas muy difíciles de atomizar que bloquearan el secador. Pocas veces se emplea el incremento de la temperatura de sólidos como un método para mejorar la eficiencia de los secadores por su alto costo y posibilidad de descomposición de los sólidos. Para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo a la entrada de los gases puedes emplear la siguiente correlación basándote en la humedad ambiental: Por cada variación de 10 °C se incrementa la humedad 0.0004 lb agua/ lb aire seco

Las fórmulas y las expresiones matemáticas utilizadas para la determinación de los parámetros que definen un proceso de secado neumático como el que estamos estudiando, según los estudios y resultados contenidos en el texto de *Perry, 1992 McGraw-Hill*, son las definidas a continuación:

Humedad del material en base seca:

La humedad del material base seca tanto a la entrada como a la salida puede ser determinada por medio de la relación:

$$W_s = \frac{W_h}{1 - W_h}$$

donde:

Wh = humedad de los sólidos en base húmeda.

Volumen húmedo del aire:

Por otro lado el volumen húmedo (en unidades inglesas) se calcula por medio de la relación:

$$V_h = 359 \cdot \left(\frac{1}{P} \right) \cdot \left(\frac{T + 460}{492} \right) \cdot \left(\frac{1}{M_{aire}} + \frac{Y}{M_{agua}} \right)$$

donde:

Vh = volumen húmedo del aire ($\frac{ft^3}{lb}$).

T = temperatura promedio de gases (°F).

P = presión del sistema (atm).

Y = humedad absoluta (suponiendo una humedad promedio entre la entrada y salida).

Maire, Magua = pesos moleculares de aire y agua.



Masa de gases utilizados:

La densidad media de los gases es igual al inverso del volumen húmedo.

$$\rho = \frac{1}{V_h}$$

Para el cálculo de la cantidad de gases manejados se utiliza:

$$w = V_m \cdot A \cdot \rho$$

donde:

V_m = velocidad media de los gases en ft/min

A = área de la sección transversal en ft² (utilizando un diámetro de 75 mm)

ρ = densidad del gas en lb/ft³

Masa Velocidad de los gases:

Una vez obtenida la masa utilizada de los gases, es posible determinar la masa velocidad de los gases, necesaria para determinar la longitud de transferencia y el coeficiente volumétrico de transferencia.

La masa velocidad se definirá entonces como:

$$G = \frac{w'}{A}$$

donde:

w' = gasto másico de aire en lb/hr .

A = área transversal del ducto en ft².

Capacidad de secado.

La capacidad de secado como cantidad de agua evaporada es:

$$W = (W_{s1} - W_{s2}) \cdot F_s$$

Flujo de sólidos en alimentación

Las letras F representan el flujo de sólidos; entonces F_s es igual a la capacidad de alimentación, base sólidos secos, y se determina por medio de la ecuación:

$$F_s = F_2 - (F_2 \cdot W_{h2})$$



Para calcular finalmente el flujo de sólidos reales alimentados al secador se emplea la siguiente ecuación:

$$F_1 = F_s + (F_s \cdot W_{s1})$$

Calor suministrado dentro del sistema

El calor suministrado dentro del sistema se puede definir como:

$$q_s = w \cdot cp \cdot (T_1 - T_{amb})$$

8.3.1. Consumo de Calor Unitario y Eficiencias Térmicas

Los consumos unitarios de calor y los valores de eficiencias térmicas de la operación de secado son expresiones del comportamiento de un secador.

En términos prácticos expresan la cantidad de calor necesario para producir una unidad de producto seco hasta una cierta humedad (según las especificaciones deseadas) o bien la cantidad de calor por unidad de agua evaporada. Las ecuaciones siguientes presentan estas relaciones:

$$J_p = \text{consumo unitario de calor por producto} = \frac{q_s}{F_2} [=] \frac{BTU}{lb\text{producto}}$$

$$J_a = \text{consumo unitario de calor por agua evaporada} = \frac{q_a}{W} [=] \frac{BTU}{lb\text{agua}}$$

La eficiencia térmica es directamente dependiente de las temperaturas de operación y en términos generales se define como la relación entre:

$$\text{Calor usado en la evaporación} / \text{calor suministrado}$$

De acuerdo a lo anterior la eficiencia se incrementa cuando la temperatura del aire de entrada se eleva (si la naturaleza del producto y el diseño del secador lo permite) y el secador



se opera a una temperatura de salida tan baja como lo permite el proceso (calidad y especificaciones del producto).

Considerando estos parámetros anteriores, la *eficiencia térmica* de la operación de secado puede expresarse de las siguientes maneras:

Eficiencia Térmica Global: Se define como la fracción total del calor suministrado al secador en relación al calor usado en el proceso. En la Figura 19, se puede ver la gráfica de la eficiencia global. La relación siguiente proporciona un valor aproximado:

$$h_{global} = \frac{T1 - T_{2a}}{T1 - T_{amb}} \cdot 100$$

donde:

T_{amb} = temperatura ambiente bulbo seco.

T_{2a} = temperatura de salida de los gases como si la operación fuese verdaderamente adiabática, es decir que puede considerarse como la temperatura teórica de salida del gas esperada si no hubiese pérdidas de calor.

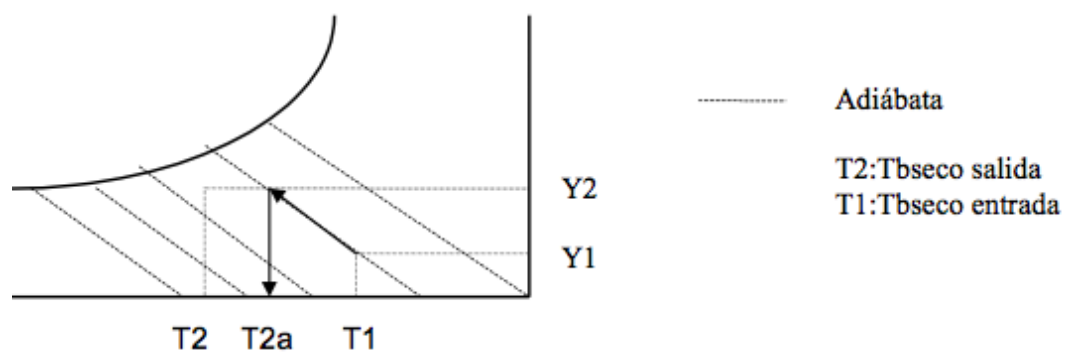


Fig. 19. Eficiencia global.

Eficiencia evaporativa: Se define como la relación entre la capacidad de evaporación real con la capacidad que se obtendrá en el caso ideal de que el aire de salida hubiese llegado hasta la saturación. En la Figura 20, se puede ver la gráfica de la eficiencia



evaporativa. Dicha eficiencia se puede calcular aproximadamente mediante la ecuación siguiente:

$$h_{\text{evaporativa}} = \frac{T_1 - T_{2a}}{T_1 - T_s} \cdot 100$$

donde:

T_s = temperatura de saturación.

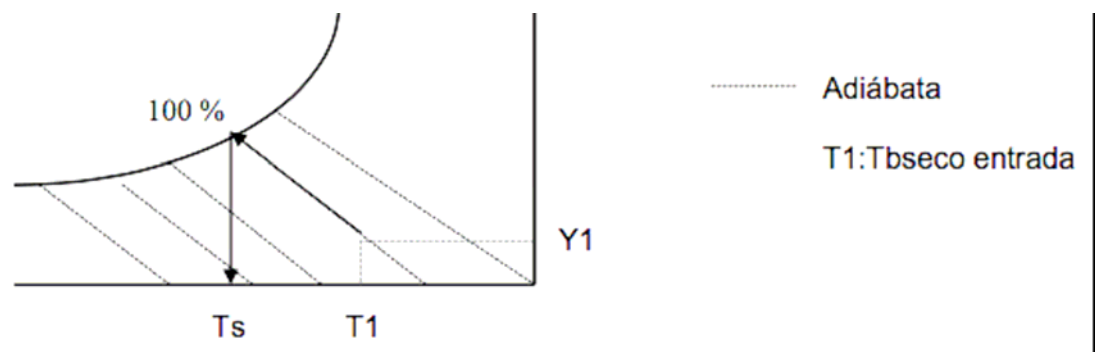


Fig. 20. Eficiencia evaporativa

Porcentaje de calor perdido: Finalmente basándose en las temperaturas es posible estimar el porcentaje de calor perdido por concepto de convección, por la radiación del Venturi de alimentación, por los ductos de secado, en el aislamiento y en el colector ciclónico, así como por el calentamiento que lleva el producto ya seco.

$$\text{Calor perdido} = \frac{T_{2a} - T_2}{T_1 - T_{2a}} \cdot 100$$

Por último, en cualquier secador de tipo directo el numero de unidades de transferencia NUT, se define como:

$$\text{NUT} = \frac{T_1 - T_2}{\Delta T_{\log}}$$

En donde ΔT_{\log} es la diferencia media logarítmica de temperatura entre gas y el sólido en todo el secador.



$$\Delta T \log = \frac{(T_1 - T_{s1}) - (T_2 - T_{s2})}{\ln \left[\frac{T_1 - T_{s1}}{T_2 - T_{s2}} \right]}$$

Por otro lado, la longitud de una unidad de transferencia se define:

$$LUT = \frac{L}{NUT}$$

o bien:

$$LUT = \frac{G \cdot cp}{U_a}$$

donde: L = longitud total del secador . G = masa velocidad del gas

El coeficiente volumétrico de transferencia se define:

$$U_a = \frac{q_s}{V(\Delta T \log)}$$

donde: V = volumen del secador, tomando los siguientes datos:

De acuerdo con lo indicado en *Perry, 1992 McGraw-Hill*, la masa velocidad (gasto másico), de cálculo para un sistema de secado por transporte neumático para fines de cálculo es la diferencia de la velocidad del aire y la del sólido. En el mismo texto, por medios experimentales se estima que esta diferencia es del 20% por ello para el cálculo la G es igual a la del aire por 0.2.

8.4.- DISEÑO DEL SEPARADOR DE CICLÓN

Es el equipo de recolección de polvo que se emplea con mayor frecuencia. En la Figura 21, se puede ver un ciclón, en el cual el gas cargado de polvo penetra tangencialmente en una cámara cilíndrica o cónica, en uno o más puntos, y sale de la misma a través de una abertura central. En virtud de su inercia, las partículas de polvo tienden a desplazarse hacia la pared exterior del separador, desde la cual son conducidas a un receptor.



El ciclón es esencialmente, una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional se sustituye con la aceleración centrífuga. En condiciones de operación utilizadas comúnmente, la fuerza o aceleración centrífuga de separación varían unas cinco veces la gravedad, en los ciclones de baja resistencia y diámetro muy grande, hasta 2500 veces la gravedad, sobre todo en las unidades muy pequeñas de alta resistencia. En métodos de diseño la entrada inmediata a un ciclón es casi siempre rectangular.

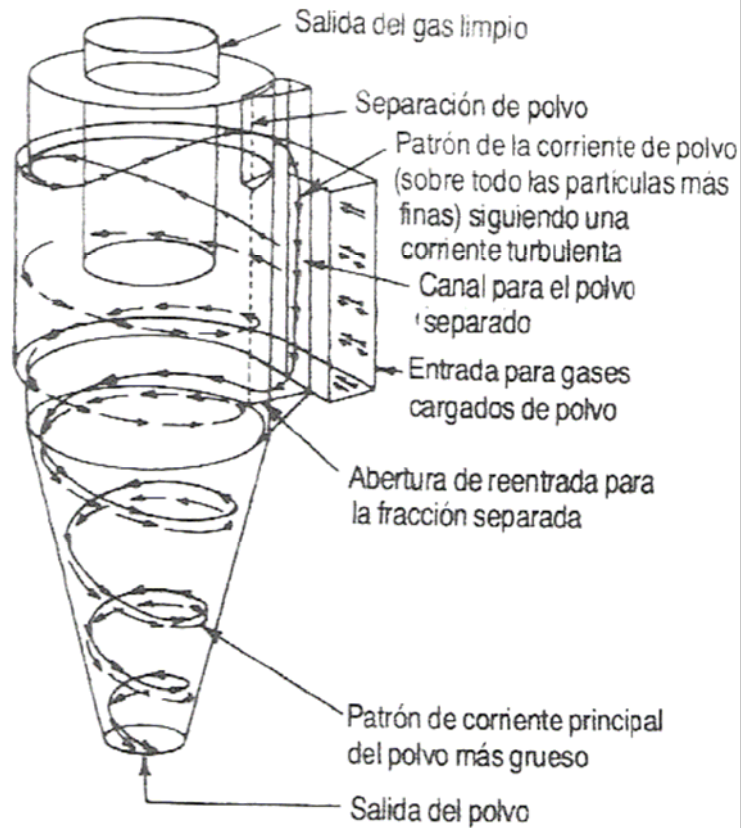


Figura 21. Ciclón Van Tongeren (*Buell Engineering, Co*)



Campo de aplicación

Dentro del intervalo de sus capacidades de funcionamiento, los recolectores de ciclón son uno de los medios menos costosos para la recolección de polvo, desde el punto de vista de la inversión y de la operación.

El rango de trabajo donde un ciclón es altamente eficiente, comprende tamaños de partículas mayores de $5\ \mu\text{m}$ y menores de $200\ \mu\text{m}$. Además los ciclones se utilizan para eliminar tanto sólidos como líquidos presentes en los gases y se han operado a temperaturas tan elevadas como 1000°C y presiones tan altas como $50.700\ \text{kPa}$ (500atm).

Patrón de flujo

En un ciclón, la trayectoria del gas comprende un doble vértice, donde el gas dibuja una espiral descendente en el lado de fuera y ascendente en el lado interior. Cuando el gas penetra en el ciclón, su velocidad sufre una redistribución de tal modo que la componente tangencial de la velocidad aumenta al reducirse el radio, como indica la expresión V_s . La velocidad espiral dentro de un ciclón puede alcanzar un valor varias veces mayor que la velocidad promedio del gas de entrada. Los análisis teóricos revelan que n debe ser igual que 1.0 en ausencia de fricción de pared. No obstante, las mediciones reales señalan que n puede variar de 0,5 a 0,7 en una porción grande del radio del ciclón. Aunque la velocidad se acerca a cero junto a la pared, la capa limítrofe es lo suficientemente delgada para que las mediciones del tubo pitot muestren velocidades tangenciales relativamente altas en ese punto, como se ilustra en la Figura 22. La velocidad radial V_r se dirige hacia el centro en casi todas las porciones del ciclón, excepto en el centro, en donde se dirige hacia fuera.

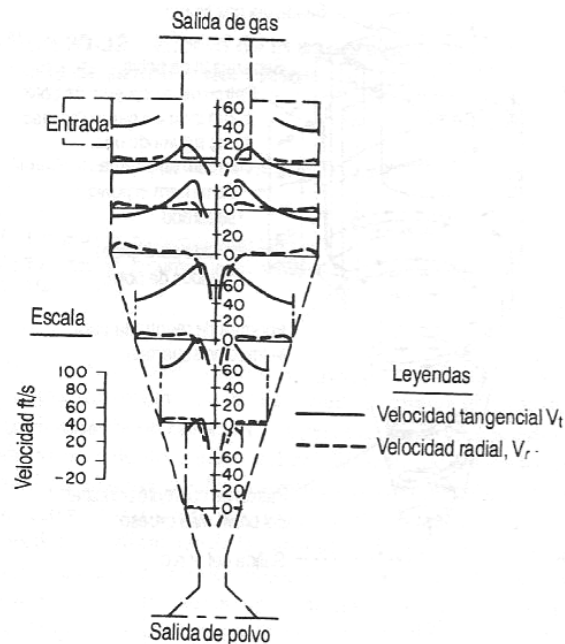


Figura 22. Variación de la velocidad tangencial y radial en distintos puntos del ciclón.

Caída de presión

La caída de presión en un ciclón, así como la pérdida de presión por fricción, se expresa de un modo más conveniente en términos de la carga de velocidad basada en el área de entrada inmediata del ciclón, mediante la ecuación, que se expresa en pulgadas de agua:

$$h_i = 0,0030 \rho V_c^2$$

en donde $\rho = \text{lb/ft}^3$ y $V_c = \text{ft/s}$.

La pérdida de fricción en el ciclón es una medida directa de la presión estática y la potencia que debe desarrollar un ventilador y se relaciona con la caída de presión mediante la expresión

$$F_{cv} = \Delta p_{cv} + 1 - (4A_c / \Pi D_e^2)^2$$



En general la pérdida por fricción en los ciclones que se encuentra en la práctica varía de 1 a 20 cargas de velocidad de entrada, según las proporciones geométricas.

Eficiencia de recolección

A pesar de los diversos esfuerzos para producir un cálculo teórico del rendimiento de los ciclones, aún no existe una relación que haya recibido una aceptación general. Se han realizado varios intentos para calcular el diámetro crítico de partículas, es decir, el diámetro de la partícula más pequeña que teóricamente se separa de la corriente de gas con una eficacia de 100%.

En realidad, el patrón de flujo es más complejo que el supuesto y no existe en realidad un diámetro crítico de partícula.

El diámetro real de corte y la curva de eficiencia fraccionaria se han determinado experimentalmente, por lo que para un ciclón como el que estamos estudiando la curva empírica de eficiencia fraccionaria que aparece como una línea continua puede ser representada por la ecuación siguiente:

$$\eta = \frac{(D_p / D_{pc})^2}{1 + (D_p / D_{pc})^2}$$

Donde los parámetros que definen la ecuación pueden verse en la Figura 23 de un ciclón tipo Venturi.

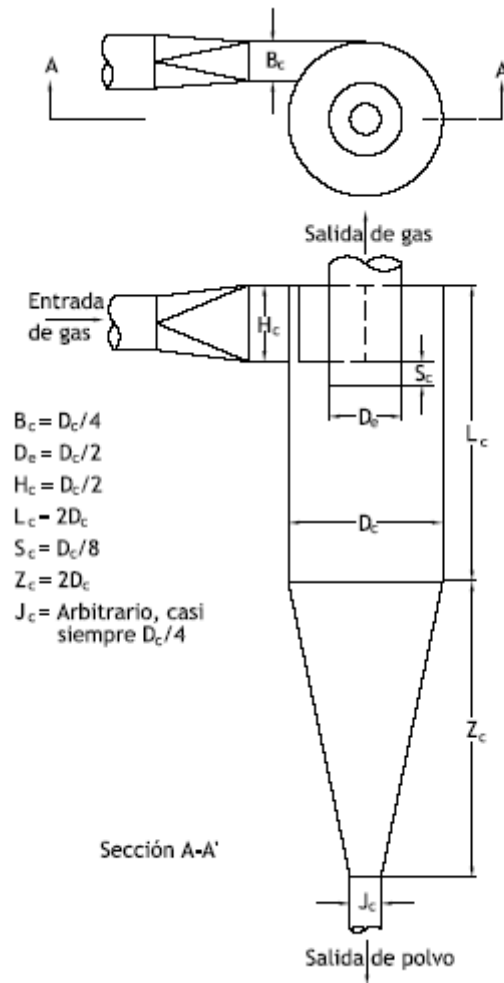


Figura 23, proporción de un secador de ciclón.



9. CUMPLIMIENTO DE LA LEGISLACIÓN VIGENTE.

En el Anexo 7 se pueden ver las disposiciones legales que afectan al diseño y construcción de este prototipo de sistema de secado de materiales lignocelulosicos relacionados con el subproducto del olivar.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

Acosta, E., Estudio básico de implantación de nuevo olivar superintensivo, 2009, [http://www.olivarintensivo.com\(modules.phpname=News&file=aticle&sid=5](http://www.olivarintensivo.com(modules.phpname=News&file=aticle&sid=5)

Agencia Andaluza de la Energía (2008)

www.agenciaandaluzadelaenergia.es/agenciadelaenergia/portal/com/bin/contenidos/proyectos/areas/energiasrenovables/proy_biomasa1202479474122_la_biomasa_en_andalucia_en08.pdf.

AMA, Sistemas de obtención de aceite de oliva sin producción de alpechín situación actual, informe nº1/94. Departamento de investigación, Consejería de cultura y medio ambiente, junta de Andalucía, 1994.

Barranco, D., Jornadas sobre el futuro del olivar y del aceite de oliva en Andalucía, Modelos productivos en el olivar tradicional, intensivo y superintensivo, 2007, <http://www.olivarsosteniblejaen.com/anexo.pdf>.

COAG, Coordinadora de organizaciones de agricultores y ganaderos, Aceite de oliva, Análisis Agroganadero, Anuario, 2009, 1-6. <http://www.coag.org/index.php?s=1&n=1-4&np=1>

COI, 2009, <http://www.inversionesagricolas.com/noticias/noticia62.html>.



Cuevas, M., Sánchez, S. Bravo, V., García Martín, J.F. Fermentation of enzymatic hydrolysates from olive Stone by *Pachysolen tannophilus*, Journal Technology Biotechnology, 2009, 84, 461-467.

Fernández-Bolaños H., Felizón B., Heredia A., Rodríguez R., Guillén R., Jiménez A., Characterization of the lignin obtained by alkaline delignification and of the cellulose residue from steam-exploded olive stones. Bioresource Technology, 1999, 68, 121-132.

Fernández diez, M.J. Las proteínas de la semilla de Aceitunas. La fracción soluble en agua destilada, Grasa y Aceites, 1961, 12, 67-72

Maestro-Durán, León-Caballero, R., Ruíz-Gutiérrez, R., Fiestas y Vázquez-Roncero, A., Glucósidos Amargos de las semillas del olivo (*Olea Europeae*), Grasas y Aceites, 1994, 45, 332-335.

Manual de cálculo de transporte neumático UMPAL, Umbert Ibáñez J., Bellisco Ed. Técnicas y Científicas, 1ªEd2012.

Maymone, B., Battaglini, A. y Tiberio, M., Ricerche sul valore nutritivo della sansa d'olive, Alimentazione Animale, 1961, 5, 4, 219-250.

Mingo, M. y Romero, J.M. Estudio químico analítico del aceite de huesos de aceitunas., Rev. De la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, 1953, 47, 553-585

Molina Alcaide, E. Y Nefzaoui, A., Recycling of olive oil by-products. Possibilities of utilization in animal nutrition, International Biodeterioration & Biodegradation, 1996, 227-235.

Nefzaoui, A., Etude de l'utilisation des sous-produits de l'olivier en alimentation animal en Tunisie, Dirección de Producción y salud Animal, FAO, Roma, 1983.



Pastor, M. Olivar, plantaciones intensivas y superintensivas, *Vida Rural*, 2000, 101, 44-46

Pardo, J.E. Pérez, J.I. y Alvarruiz., Aplicación del sistema de análisis de peligros y puntos de control crítico (APPCC) en la línea de elaboración de aceite de oliva virgen, *Grasas y Aceites*, 2002, 53, 3, 309-318.

Pardo J.E. Pérez, J.I. Sánche, J.E. y Alvarruiz, A., Aplicación del sistema de análisis de peligros y puntos de control crítico (APPCC) en la línea de envasado de aceite de oliva virgen, *grasas y aceites*, 2003, 54, 1, 58-64

Perry, 1992 McGraw-Hill.

Rivas, M., Azucares de la semilla de Aceitunas. Identificación por cromatografía sobre Papel y Cromatografía Gas- Líquido, *Grasas y Aceites* 1983,34, 13-16.

11. CONCLUSIONES.

Por lo anteriormente expuesto, el alumno que suscribe el trabajo, ve debidamente justificadas el equipo que proyecta ya que las razones y fundamentos que han servido de base para la confección y justificación del presente Trabajo Fin de Master, están expuestas en la anterior Memoria (sobretudo justificación y antecedentes), y en el resto de Documentos (Cálculos, Anexos, Planos, Pliego de condiciones y Presupuesto) que integran este trabajo. Quedando a disposición del Tribunal calificador para aclarar y cumplimentar cuántas cuestiones se juzguen necesarias.

Jaén, septiembre de 2.012

Fdo. Pedro Javier Quesada Labesa