



*Escola Superior  
de Tecnologia e Gestão  
Instituto Politécnico de Portalegre*

**CARACTERIZACIÓN Y PREPARACIÓN DE RESIDUOS DE BIOMASA CON  
ENSAYOS EXPERIMENTALES DE SECADO TÉRMICO Y COMBUSTIÓN NO  
CONTAMINANTE**

Autor: Raúl Al-Kassir Al-Karany

Orientador: Doctor Paulo Sérgio Duque de Brito (ESTG-IPP)

Tesis presentada en este Instituto para la obtención del grado de Máster

“TECNOLOGIAS DE VALORIZAÇÃO AMBIENTAL E PRODUÇÃO DE ENERGIA”

Portalegre  
Junio de 2013

## RESUMEN

En este trabajo de la presente Tesis de Máster se ha realizado un estudio de evaluación de las características de los diferentes residuos de Alentejo, con el objeto de su empleo como combustibles no contaminantes. Se han caracterizado varias muestras de esos residuos mediante los análisis inmediato, elemental y de las cenizas, y posteriormente se ha determinado el poder calorífico de los mismos. También se ha realizado el cálculo térmico del secadero para estimar la longitud necesaria de secado. Posteriormente, se ha realizado una serie de ensayos experimentales en la instalación de secado y combustión, para el orujo de aceituna. Los resultados obtenidos muestran que el orujo de aceituna seco, obtenido en el proceso de secado, tiene un poder calorífico superior de valor medio, que sería combustible no contaminante en aplicaciones de combustión directa en calderas tanto para calefacción y agua caliente sanitaria como para la producción de vapor en centrales térmicas de producción de energía eléctrica.

**Palabras-claves:** Combustión, orujo de aceituna, poder calorífico, residuos, secado.

---

## RESUMO

Neste trabalho desta tese de Mestrado foi realizado um estudo de avaliação das características dos diferentes resíduos do Alentejo, com vista à sua utilização como combustíveis limpos. Várias amostras desses resíduos foram caracterizadas perante o análise direto, elemental e cinzas, e, em seguida, determinou-se o poder calorífico deles. Tem também realizado o cálculo do secador térmico para estimar o comprimento necessário de secagem. Posteriormente, foi realizada uma série de testes experimentais sobre a instalação de secagem e de combustão para o bagaço de azeitona. Os resultados mostram que o bagaço de azeitona seco, obtido no processo de secagem, tem um poder calorífico superior de valor meio, que seria queimado como combustível em aplicações de combustão direta em caldeiras para aquecimento e água quente, e para a produção de vapor nas centrais térmicas de produção de eletricidade.

**Palavras-chave:** Combustão, Bagaço de azeitona, poder calorífico, resíduos, secagem.

## **ABSTRACT**

In this work of the present Master Thesis the evaluation study of the characteristics of different wastes of Alentejo has been carried out, with a view to its use as clean fuels. Several samples have been characterized by the proximate, elemental and ash analysis, and then their calorific value have been determined. Also the dryer thermal calculation has been performed to estimate the required length of drying. Subsequently, a series of experimental tests have been developed in the drying and combustion installation for the olive pomace. The results show that the dry olive pomace, obtained in the drying process, has a medium calorific value which means that it can be used as a fuel in direct combustion applications in boilers for both heating and hot water and for steam generation in thermal power plants for electricity production.

**Key-words:** Combustion, olive pomace, calorific value, residues, drying.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	V
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	VII
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	VIII
<b>NOMENCLATURA</b> .....	IX
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes y estado del arte .....	1
1.2 Objetivos y descripción de actividades .....	4
1.3 Estructuración de la Tesis .....	5
1.4 La energía y el medioambiente .....	6
1.5 Preparación y secado térmico de residuos .....	16
1.5.1 Definición y objeto del secado .....	16
1.5.2 Características de los residuos de biomasa a desecar .....	16
1.5.3 Períodos, duración y fases del secado .....	17
1.6 Tipos de secaderos .....	18
1.6.1 Estufas de secado .....	19
1.6.2 Estufas de tambor .....	20
1.6.3 Turbosecaderos .....	21
1.6.4 Canal de secado .....	22
1.6.5 Secaderos de tambor .....	23
<b>2 PARTE EXPERIMENTAL</b> .....	<b>25</b>
2.1 Caracterización de los residuos estudiados .....	25
2.1.1 Análisis inmediato .....	27
2.1.1.1 Fundamentos teóricos .....	27
2.1.1.2 Determinación de la humedad .....	28
2.1.1.3 Determinación del contenido en cenizas .....	31
2.1.1.4 Determinación de materias volátiles .....	35
2.1.1.5 Determinación del contenido en carbono fijo .....	37
2.1.2 Determinación del poder calorífico .....	37
2.1.3 Determinación de la composición de las cenizas .....	39
2.1.4 Análisis elemental .....	40
2.2 Instalación de ensayos de secado y combustión .....	41
2.2.1 Estufa de combustión de pellet .....	43
2.2.2 Analizador de gases de combustión .....	44
2.2.3 Otros instrumentos .....	45
<b>3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>46</b>
3.1 Cálculo del secadero estudiado .....	46
3.2 Estimación de la longitud necesaria del secadero .....	49
3.3 Resultados de la caracterización de los residuos .....	50
3.4 Combustión y secado del orujo de aceituna .....	55
3.5 Análisis económico y medioambiental de obtención del combustible .....	64
<b>4 CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....	<b>68</b>
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	70
ANEXOS .....	73
Anexo I: Análisis inmediato .....	73
Anexo II Análisis elemental .....	78
Anexo III Algunos resultados de combustión-secado .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo mundial de energía primaria por combustible, Mtep (fuente: BP, 2011).....	11
Figura 2. Consumo total de energía primaria de la UE-27, por fuente de energía en 2008 (Fuente: EEA, 2011a).....	11
Figura 3. Distribución de la Producción de Energía Eléctrica en Portugal en el año 2010 (Fuente: REN, 2011).....	12
Figura 4. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la UE-27, tonelada CO <sub>2</sub> equivalente per cápita (Fuente: EEA, 2011c).....	14
Figura 5. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la UE-27, por sector en el año 2008 (Fuente: EEA, 2011d).....	14
Figura 6. Evolución de la temperatura de la biomasa durante el secado.....	18
Figura 7. Estufa de secado de grano (Fuente: Kneule, 1984).....	19
Figura 8. Estufa de tambor para el secado de piña (Fuente: Kneule, 1984).....	20
Figura 9. Esquema de turbosecadero de cinta continua (Fuente: Kneule, 1984).....	21
Figura 10. Turbosecadero de cinta helicoidal (Fuente: Kneule, 1984).....	22
Figura 11. Canal de secado en corriente paralela.....	22
Figura 12. Canal de secado en contracorriente (Fuente: Kneule, 1984).....	22
Figura 13. Circulación de los gases en un secadero de tambor (Fuente: Kneule, 1984).....	23
Figura 14. Secadero de tambor directo.....	24
Figura 15. Muestra de orujo de uva.....	25
Figura 16. Muestra de residuo de miscanthus.....	25
Figura 17. Muestra de residuo de cáscara de café.....	26
Figura 18. Muestra de poda (sarmiento).....	26
Figura 19. Muestra de orujo de aceituna.....	26
Figura 20. Muestra de corcho: (a) polvo (b) corteza (c) cáscara.....	27
Figura 21. Muestra de residuos de eucalipto.....	27
Figura 22. Analizador halógeno de humedad de los residuos (KERN DBS 60-3).....	31
Figura 23. Horno mufla para quemar los residuos y obtener cenizas (Horbesal).....	32
Figura 24. Calorímetro para determinar el PCS (Parr 1351).....	39
Figura 25. Analizador de composición de las cenizas (Thermo scientific Niton XRF).....	40
Figura 26. Mapa de Alentejo (Fuentes: Viana, et al., 2010 y Rosa, et al., 2010).....	41

Figura 27. Instalación de ensayos de secado térmico (secadero sin aislamiento).....	42
Figura 28. Instalación de ensayos de secado térmico (secadero con aislamiento).....	43
Figura 19. Esquema de la estufa de combustión de pellet (EDILKAMIN).....	44
Figura 30. Analizador de gases de combustión Testo 335.....	45
Figura 31. Posición de partida de la biomasa.....	47
Figura 32. Elevación de la biomasa por efecto del sinfín.....	48
Figura 33. Disposición de estudio termodinámico.....	48
Figura 34. Productos de combustión del orujo de aceituna, medidos en diferentes puntos de la instalación experimental.....	56
Figura 35. Evolución de la temperatura en el interior del secadero, durante el proceso de secado del orujo de aceituna.....	57
Figura 36. Variación de humedad del orujo de aceituna frente al tiempo de secado.....	59
Figura 37. Evolución de la temperatura del gas de combustión.....	61
Figura 38. Variación de la temperatura ambiente durante los ensayos.....	61
Figura 39. Porcentaje de oxígeno del gas producto de combustión durante el proceso de secado.....	62
Figura 40. Concentración del monóxido de carbono del gas producto de combustión durante el proceso de secado.....	62
Figura 41. Porcentaje del dióxido de carbono del gas producto de combustión durante el proceso de secado.....	63
Figura 42. Concentración de óxido de nitrógeno del gas producto de combustión durante el proceso de secado.....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Biomasa estimada en países europeos considerados (fuente: Esteban y Carrasco, 2011).....	3
Tabla 2. Masas determinadas y valor de humedad inicial del combustible.....	30
Tabla 3. Resumen datos del combustible (análisis del contenido en cenizas).....	35
Tabla 4. Resumen datos del combustible (análisis de materias volátiles).....	36
Tabla 5. Caracterización de los residuos estudiados de Alentejo.....	51
Tabla 6. Análisis y composición de las cenizas de los residuos de Alentejo.....	54
Tabla 7. Ensayos de combustión y secado del orujo de aceituna.....	55
Tabla 8. Ensayos del proceso de secado del orujo de aceituna.....	57
Tabla 9. Humedad del orujo de aceituna con respecto al tiempo de secado.....	58
Tabla 10. Pesos de las muestras para el cálculo de la humedad.....	59
Tabla 11. Ensayos de secado del orujo de aceituna, velocidad de giro 3 rpm, 1ª pasad.	60
Tabla 12. Ensayos de secado del orujo de aceituna, velocidad de giro 3 rpm, 2ª pasad.	60

## **ACRÓNIMOS**

AIE – Agencia Internacional de Energía  
APA – Agencia Portuguesa del Ambiente  
CO – Fórmula química del Monóxido de Carbono  
CO<sub>2</sub> – Fórmula química del Dióxido de Carbono  
CF – Cenizas de Fondo  
CV – Cenizas de Volátiles  
DGEG – Dirección general de energía y geología  
EEA – Agencia Europea del Ambiente  
FER - Fuentes de Energía Renovables  
GEI – Gases de Efecto Invernadero  
H<sub>2</sub> – Símbolo químico del Hidrógeno  
MAPV - Valor medio de la productividad.  
NO – Fórmula química del Óxido de Nitrógeno  
O<sub>2</sub> – Símbolo químico del Oxígeno  
PCI – Poder Calorífico Inferior  
PCS – Poder Calorífico Superior  
RD – Real Decreto  
REN – Red Eléctrica Nacional  
RM – Resolución Ministerial  
RSU – Residuos Sólidos Urbanos  
UE – Unión Europea

## NOMENCLATURA

$A_b$  - área de intercambio entre la biomasa y el gas caliente,  $m^2$

$b_h$  - Base húmeda

$b_s$  - Base seca

$c_{p_{bioseca}}$  - Calor específico de biomasa,  $kJ/kg \cdot ^\circ C$

$c_{p_{gas}}$  - Calor específico del gas,  $kJ/kg \cdot ^\circ C$

GWh - Unidad de energía eléctrica, gigawatt hora

H - Humedad del producto o residuo, %

$h_m$  - Contenido medio de humedad, %

$h_{agua}$  - Coeficiente de película del agua,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$h_{bio1}$  - Coeficiente de película de biomasa a la entrada del secadero,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$h_{bio2}$  - Coeficiente de película de biomasa a la salida del secadero,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$h_{gas}$  - Coeficiente de película del gas,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$h_{gas1}$  - Coeficiente de película del gas a la entrada del secadero,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$h_{gas2}$  - Coeficiente de película a la salida del gas del secadero,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

L - Longitud del secadero, m

$L_{circ}$  - Longitud de la circunferencia de contacto entre el gas y la biomasa, m

$\dot{m}_{agua}$  - Caudal másico del agua,  $kg/s$

$\dot{m}_{bioseca}$  - Caudal másico de la biomasa seca,  $kg/s$

$\dot{m}_{gas1}$  - Caudal másico del gas a la entrada del secadero,  $kg/s$

$\dot{m}_{gas2}$  - Caudal másico del gas a la salida del secadero,  $kg/s$

Mtep - Unidad de energía, millones de toneladas equivalentes de petróleo

MW - Unidad de medida de potencia, megawatt

MWe - Megawatt eléctrico

ppm - Unidad de concentración, partes por millón

$Q_{gas}$  - Calor cedido por el gas de combustión, W

$Q_{pérd}$  - Pérdida calorífica al exterior del secadero, W

qA - Pérdidas por gases, %

ren - Rendimiento de combustión de la estufa, %  
TA - Temperatura ambiente, °C  
Temp. - Temperatura, °C  
T-gas - Temperatura del gas, °C  
T<sub>1</sub> - Temperatura de salida de los humos, °C  
T<sub>2</sub> - Temperatura de salida del aire de la estufa, °C  
T<sub>3</sub> - Temperatura de entrada al secadero, °C  
T<sub>4</sub> - Temperatura de segunda toma del secadero, °C  
T<sub>5</sub> - Temperatura de tercera toma del secadero, °C  
T<sub>6</sub> - Temperatura de salida del secadero, °C  
T<sub>7</sub> - Temperatura de toma de muestra de la biomasa, °C  
T<sub>bio1</sub> - Temperatura de entrada de biomasa al secadero, °C  
T<sub>bio2</sub> - Temperatura de salida de biomasa del secadero, °C  
T<sub>gas1</sub> - Temperatura de entrada del gas al secadero, °C  
T<sub>gas2</sub> - Temperatura de salida del gas al secadero, °C  
t - Tiempo, s  
U<sub>b</sub> - Coeficiente global de transmisión de calor, W/m<sup>2</sup>·°C  
V - Velocidad, m/s  
 $\Delta Tm_{lg}$  - Incremento de temperatura media logarítmica, °C  
 $\eta$  - Rendimiento térmico del secadero, %  
 $\lambda$  - Exceso de aire  
 $\tau_{bio}$  - Grado de llenado de la biomasa en el interior del tambor (superficie transversal llena de biomasa referente a la sección transversal del tambor), %

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes y estado del arte

En Alentejo (Portugal) y Extremadura (España) son generados anualmente cantidades significativas de residuos agrícolas e industriales. Estos residuos pueden ser utilizados en procesos de combustión como combustibles alternativos, desde el punto de vista económico y ambiental. La cantidad de calor liberado en la combustión completa de un proceso es llamado poder calorífico. En los combustibles cuyos humos contienen vapor de agua podemos distinguir entre poder calorífico inferior PCI y poder calorífico superior PCS. Se llama poder calorífico inferior a la cantidad de calor liberado en un proceso de combustión completa cuando el agua está presente en forma de vapor. En cuanto al poder calorífico superior es la cantidad de calor liberado en el proceso de combustión completa, incluyendo el calor de condensación del vapor de agua contenido en los humos. En calderas convencionales no se puede provocar la condensación del gas de combustión, ya que eso provocaría daños de corrosión en las superficies de calentamiento. Por esta razón, en los cálculos de rendimiento se utiliza para calderas convencionales como magnitud de referencia el PCI. De un modo general puede decirse que cuanto mayor sea la diferencia entre el PCS y el PCI, mayor sería la eficiencia de la energía que puede ser obtenida utilizando la técnica de condensación. Las calderas de biomasa son una red familiar y para su alimentación se utiliza un sistema mecánico para el movimiento de residuos de biomasa y los subproductos de molinos, pellet, etc...

El proceso de secado es una transferencia de calor y masa, a través del cual un producto es pasado a partir de un estado inicial, con un cierto grado de humedad para otro estado final con menos humedad, de modo a obtener un producto diferente al inicial. El agua contenida en el producto puede ser inherente (que forma parte de la estructura molecular del producto) o adicionado (como resultado de un lavado involuntario o precipitación del producto). Reduciendo esta humedad se consigue mejorar las características del combustible (elevado PCS y baja humedad cuando es usado ya que ambas propiedades son inversamente proporcionales). Los secaderos son equipamientos importantes utilizados para realizar una operación energética elemental en la industria. Los principales objetivos pretendidos con operaciones de secado son facilitar un proceso industrial, el éxito de la utilización de un

producto, mejorar el desempeño de una instalación y reducir los costes de instalación (almacenamiento, transporte y almacenamiento del producto).

Los residuos agrícolas son plantas en los cuales es preciso separar sus partes para la obtención del fruto y facilitar el cultivo apropiado posteriormente. Hay una gran cantidad de residuos con un potencial energético interesante que pueden tener alguna utilidad local, pero cuya eliminación es un problema para el trabajo agrícola. Estos residuos se presentan en: granos de cereales, causando pajas, huertos y viñedos, cuyo volumen anual de poda es una fuente significativa de material combustible; algunos cultivos industriales, como el textil y de aceite, que producen como residuos los tallos. Los residuos forestales son aquellos que, durante siglos, han sido la fuente de energía más importante para la humanidad. Los seres humanos no usan toda la riqueza que proporciona el monte, desperdiciando una parte considerable en forma de ramas, cortezas y serrín. Esta menor utilización ha aumentado con la utilización de combustibles gaseosos derivados del petróleo, debido a su bajo precio y facilidad de uso. Estos residuos son obtenidos a partir de las ramas, cortezas, serrines, ramas, hojas, troncos, raíces, etc.

Estando en Alentejo numerosos cultivos agrícolas de la vid y del olivo, con una producción de un volumen significativo de residuos sólidos orgánicos, tiene mucho interés evaluar la posibilidad de utilizar esos residuos para la producción de energía. De esta forma, se pretende con este trabajo preparar los residuos agrícolas mediante su secado para ser usados como combustibles no contaminantes.

Existe una buena oportunidad para la creación de pequeñas y medianas empresas de generación de electricidad o de cogeneración, que desenvuelvan proyectos eléctricos con la biomasa del olivar, en zonas eminentemente agrícolas, lo que contribuiría para el crecimiento industrial de las mismas, creando puestos de trabajo estables dentro de un sector con futuro como las energías renovables. Ha habido conocimiento de la cantidad de biomasa disponible en las almazaras de Alentejo y consultando la bibliografía específica, bien como la legislación nacional y comunitaria, se optó por el estudio sobre los residuos de Alentejo.

Investigadores como (Sergio Ferreir et al., 2009) realizaron un estudio sobre el análisis de las posibilidades de provisión de bioenergía de biomasa en Portugal. También se han estudiado el potencial de biomasa, las tecnologías de conversión y el marco legal.

Otros investigadores (Esteban y Carrasco, 2011) estudiaron el potencial de biomasa residual forestal y agrícola. El resultado de su evaluación sobre los países europeos estudiados está indicado en la Tabla 1.

Tabla 1. Biomasa estimada en países europeos considerados (Fuente: Esteban y Carrasco, 2011).

Country	Forest			Agricultural		
	Potential (Tg yr <sup>-1</sup> )	Available (Tg yr <sup>-1</sup> )	MAPV (Mg ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	Potential (Tg yr <sup>-1</sup> )	Available (Tg yr <sup>-1</sup> )	MAPV (Mg ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )
Sweden	20.68	10.43	0.49	5.93	3.11	4.19
Finland	13.59	6.94	0.23	3.08	1.12	1.9
Germany	9.54	4.27	0.26	67.34	42.56	6.85
Norway	8.6	4.33	0.46	1.85	0.83	0.26
Austria	5.26	2.63	1.08	6.25	3.79	5.00
Poland	4.11	2.05	0.29	28.09	10.36	2.87
Denmark	0.74	0.37	0.88	12.99	8.17	5.80
SUBTOTAL	62.52	31.02	—	125.53	69.94	—
France	13.43	7.75	0.63	78.39	49.81	4.24
Spain	10.55	4.77	0.44	26.22	12.84	1.23
Italy	7.49	4.01	0.53	25.44	16.94	2.35
Greece	2.90	1.09	0.53	7.42	4.82	2.09
Portugal	2.23	0.64	0.29	2.38	1.70	0.96
SUBTOTAL	36.60	18.26	—	139.85	86.11	—
TOTAL	99.12	49.28	—	265.38	156.05	—

MAPV, Mean Annual Productivity Value. Valor medio de la productividad.

Un estudio sobre la caracterización del eucalipto en seis zonas de Portugal fue realizado por (Jorge Gominho et al., 2012). Ellos recogieron diferentes muestras de esas seis localidades para hacer la evaluación física y química, a fin de utilizarlos como combustible.

También (Changdong Sheng y Azevedo, 2005) hicieron un estudio de recopilación de las propiedades y características de diferentes tipos de biomasa disponibles en la literatura. Ellos han estudiado la determinación del PCS de diferentes tipos de biomasa, evaluaron sus correlaciones comparándolas con los datos obtenidos de la literatura.

(Cátia et al., 2012) realizaron un estudio descriptivo y de análisis de los productos de combustión de la madera. Ellos vieron que la totalidad de las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de combustión de la madera a nivel doméstico es del orden de 1,7 Mt y<sup>-1</sup>.

Por otra parte, para alcanzar los objetivos del acuerdo de Kioto, los sucesivos gobiernos de Portugal tienen adoptadas medidas políticas (RD62, 2006; RD66, 2006) para ayudar a reducir la dependencia del petróleo, el desenvolvimiento de la agricultura sostenible y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte.

Estudios sobre la madera han sido realizados por (Telmo et al., 2010) para determinar las características de un tipo de residuo de biomasa en Portugal. Estos investigadores realizaron el análisis inmediato, elemental y la determinación del poder calorífico, para su uso eficiente en la industria del pellet.

(Viana et al., 2012) han estudiado la caracterización y la combustión de diferentes tipos de biomasa en el centro de Portugal y el noroeste de España.

Otro estudio de investigación realizado por (Robert et al., 2006) fue el de comparar los diferentes métodos para la determinación del contenido de la humedad en la biomasa. Estos investigadores utilizaron 20 tipos de muestras de biomasa de diferentes partes de Europa, que fueron investigadas para determinar la humedad total en un horno de secado atmosférico, a tres temperaturas diferentes (80, 105 y 130 °C).

(Fernandes y Costa 2010) han enfocado sus estudios en la evaluación del potencial de residuos de biomasa, tanto residuos forestales como residuos agrícolas para la producción de energía y su utilización en la región de Marvão en Portugal. Se ha concluido que la biomasa anual residual producida en la zona de Marvão es de 10600 toneladas, lo que corresponde a un potencial de producción de energía de 106000 GJ por año.

## **1.2 Objetivos y descripción de actividades**

El principal objetivo de la presente Tesis de Máster es el de pretender evaluar las características de los diferentes residuos de Alentejo. También la realización del proceso de secado térmico de los residuos de biomasa para su utilización como combustibles no contaminantes. El estudio será realizado con ensayos de laboratorio de secado-combustión. Se pretende caracterizar física y químicamente así como las propiedades físico-químicas de

los residuos de biomasa mediante la realización de ensayos de la humedad, el análisis inmediato, el análisis elemental y el poder calorífico. Se prepararán los residuos para la reducción de su contenido de humedad en el proceso de secado y se medirá la composición de los gases resultantes de su combustión para la optimización energética y ambiental.

Así, la concretización de los objetivos trazados resulta abordar tres aspectos fundamentales:

- Caracterización de los residuos de biomasa.
- Preparación y secado térmico con combustión del orujo de aceituna.
- Evaluación del aprovechamiento de los residuos de biomasa.

### **1.3 Estructuración de la Tesis**

Para dar respuesta a los objetivos formulados en el estudio de la presente Tesis se ha estructurado el trabajo en cuatro capítulos. En el capítulo 1 de este estudio se presenta una breve introducción al tema de interés de esta Tesis y el análisis de residuos de biomasa, con una revisión profunda de la literatura, bien como el tema de los residuos de biomasa, contextualizando su relevancia y los objetivos definidos. También se presentan la problemática de la energía, alteraciones climáticas y estratégicas europeas y nacionales asociadas y la preparación de la biomasa residual, su secado térmico y combustión. En el Capítulo 2 se presenta la parte experimental, en la que se expone el objeto de estudio, siendo estudiados y caracterizados los residuos de Alentejo en este trabajo. Se presentan los ensayos experimentales de secado y combustión. En el Capítulo 4 se presentan los resultados y discusiones del procedimiento de cálculo del secadero estudiado y de la caracterización de los residuos y del proceso de combustión. Finalmente, en el Capítulo 5 se han elaborado las principales conclusiones de todo el trabajo de este estudio con la consideración de algunas recomendaciones para trabajos futuros.

## 1.4 La energía y el medioambiente

La energía tiene un papel fundamental en el desarrollo social y económico de nuestra vida. Este recurso proporciona confort personal, movilidad y riqueza, a nivel industrial y comercial (EEA, 2006). Sin embargo, el aumento constante del precio del petróleo, y las consecuentes oscilaciones del precio de los productos energéticos derivados, permitieron percibir la creciente dependencia de Europa de cara a las energías importadas, evidenciando la importancia del aprovisionamiento energético.

En conjunto el sector del transporte, industria, actividades domésticas y servicios, áreas de gran consumo de combustibles fósiles, se presentan como las principales fuentes de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), siendo actualmente responsables de cerca del 80% del total de las emisiones europeas (EEA, 2008a). Ante esta realidad Europa fue presionada en el sentido de desarrollar el sector de la energía, teniendo por base nuevas fuentes que permitan reducir la dependencia energética y que, al mismo tiempo, presenten un menor impacto ambiental (CCE, 2005). Fueron entonces aprobados una serie de documentos base que contemplaban no solo la seguridad de abastecimiento sino también impulsar el recurso de las Fuentes de Energía Renovables (FER) (MEE, 2008).

Uno de los documentos más importantes en esta temática fue la firma del Protocolo de Kioto (1997). En este contexto, las preocupaciones ambientales ganaron relevancia, siendo establecido el objetivo de estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que minimizase las interferencias antropogénicas del sistema climático. Como resultado, fue definido como meta una reducción de cerca del 5,2% de GEI, para los países desarrollados, de los niveles correspondientes a 1990, concretamente durante el período de 2008-2012. En un contexto de crecimiento económico cada vez más fuerte, la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles es mayor, con la racionalización de los recursos y el aumento de la eficiencia de los dispositivos clásicos de conversión de energía y, principalmente, por la inversión en las energías renovables que además de contribuir para disminuir la necesidad de importación de recursos, permiten alcanzar el desarrollo energético sostenible (MEE, 2008). Este concepto según (Stupak et al., 2007) se define como la energía que presenta impactos negativos mínimos en la salud humana y en el funcionamiento saludable de los sistemas ecológicos fundamentales incluyendo el ambiente.

La biomasa, la energía solar y la energía eólica son las principales fuentes renovables, suponiendo el desarrollo sostenible del sector energético. Sin embargo tenemos que dar énfasis a las particularidades de la biomasa: su multiplicidad de materias con potencial energético, entre los cuales se destacan los residuos agrícolas, forestales e industriales, y su proceso de conversión (MEE, 2008). Este puede generar tres tipos de combustible (sólido, líquido o gaseoso), lo que le confiere una flexibilidad de adaptación tecnológica de acuerdo con el objetivo establecido. Así según la Directiva 2009/28/CE de 23 de abril de 2009, relativa a la promoción de la electricidad a partir de fuentes de energías renovables en el mercado interno de la electricidad, biomasa es toda fracción biodegradable de productos y residuos provenientes de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales), de la silvicultura y de las industrias conexas, bien como la fracción biodegradable de residuos industriales y urbanos. El uso de la biomasa como combustible, principalmente como fuente de calor, se remonta a los antepasados, estando normalmente asociada a comunidades rurales (REHES, 2007).

Los avances tecnológicos observados en los últimos años tienen permitido un crecimiento de potencial de utilización de esta fuente de energía, representando en 2004, cerca del 4 % del consumo total de energía primaria (69 Mtep) (CCE, 2004). Para estimular el aprovechamiento de la biomasa fue lanzado en 2005, por la Comunidad Europea, el plano de acción de la biomasa, donde son presentadas medidas para la promoción de la utilización de esta Fuente de Energía Renovable en los transportes, en el calentamiento, y en la producción de electricidad, acompañadas de medidas transversales que afectan al abastecimiento, al financiamiento y a la investigación en el dominio de la biomasa (CCE, 2005). Además de las ventajas en el sector energético, la utilización de la biomasa presenta todavía beneficios a nivel social y forestal.

En relación al primer aspecto, se destaca la neutralidad en términos de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), bien como el desarrollo regional y local resultado de la creación de nuevos mercados para los propietarios forestales y de nuevos puestos de trabajos. A nivel forestal, la utilización de residuos forestales como fuente energética se presenta como un factor que minimiza el riesgo de incendio y su gravedad, observándose todavía una

reducción del riesgo de plagas de insectos y de infecciones de raíces de nuevo poblamiento (Stupak et al., 2007).

En el caso particular de la situación energética portuguesa, esta se caracteriza por escasos recursos energéticos fósiles endógenos, principalmente aquellos que aseguran las necesidades energéticas de la mayoría de los países desarrollados (petróleo, carbón y gas natural). Esta escasez de recursos fósiles se tradujo en una dependencia energética exterior de cerca del 81,2% y en una importación de energía primaria del orden del 96%, en 2009. Sin embargo, de cara al elevado potencial en energías renovables, Portugal lleva a lo largo de los últimos años invirtiendo significativamente en la producción de energía de origen renovable, presentando la tercera subida más elevada de Europa entre 1999 - 2009. Los esfuerzos desarrollados en la diversificación del sector energético y en la promoción de fuentes renovables colocan Portugal entre los Estados miembros de la UE con mayor incorporación de FER en la producción total de electricidad y entre los principales miembros de la Agencia Internacional de Energía (AIE), constituyendo una referencia mundial en este dominio, sobre todo en lo que se refiere respecto a la energía eólica e hídrica. En el año 2009 el peso de las energías renovables en el total de la energía primaria fue del 20%, valor más elevado en los últimos 10 años, registrándose todavía, y según los datos de la DGEG, una incorporación de estas fuentes en el consumo bruto de energía eléctrica de cerca del 50,1% (2010), superando la meta comunitaria del 39% (Directiva 2001/77/CE).

De cara a los recursos endógenos portugueses, la energía hidráulica se presenta como la principal fuente de energía renovable para la producción de electricidad con un total de potencia instalada en centrales hidroeléctricas de cerca de 4888 MW en 2009. Cerca de un décimo de esta potencia (466 MW) representa la actual capacidad instalada en centrales de biomasa (DGEG, 2011). Un importante aspecto ha dado paso para la expansión de las centrales, la biomasa forestal en 2006, con el lanzamiento de un concurso para la atribución de quince lotes para centrales de biomasa, con una capacidad instalada total de 100 MW en 2010, y un consumo anual de 1 millón de toneladas de biomasa forestal.

En total, hoy en día se ha reconocido que el recurso de la biomasa es una medida fundamental desde el punto de vista de los beneficios ambientales esperados, en particular en la reducción de las emisiones de GEI, debido a sus múltiples aplicaciones: producción

de electricidad, de calor y de biocombustibles. Sin embargo, no fueron todavía evaluados de forma integrada los impactos ambientales asociados a la cadena de valorización energética de biomasa, desde la producción de materia prima hasta su utilización final.

La cogeneración es un proceso para generar energía adicional que usa lo que de una manera o de otra sería desperdiciado. Puede ser definida como un proceso de la termodinámica en el cual ocurre producción simultánea y secuencial de la energía eléctrica o mecánica, y la energía térmica útil, a partir de una única fuente de energía. La cogeneración es una tecnología ya introducida y usada eficientemente en aplicaciones industriales y comerciales, incluyendo industrias químicas, refinerías petrolíferas, industriales de la pasta y del papel, cementeras y metalúrgicas, debido a las incuestionables ventajas, teniendo costos de producción bastante aceptables, y niveles de eficiencia bastante buenos. La cogeneración reduce costes, mejora la eficiencia y la competitividad y crea puestos de trabajo y otros beneficios económicos (Azevedo, 2001). La cogeneración es utilizada por ser un modo de generación con una relación costo/beneficio bastante elevado tanto en energía eléctrica, como térmica. Esta relación deriva no solo de la generación de energía eléctrica, también del hecho de que el vapor generado en centrales y plantas térmicas sería utilizado doblemente. Otro elemento atractivo de la cogeneración es la variedad de los tipos de combustibles que pueden ser utilizados, (residuos forestales y agrícolas, principalmente los residuos sólidos de las almazaras, fuelóleo, gas natural, gas propano, residuos industriales, etc.).

En España, la cogeneración se inició como solución para los orujos provenientes de las almazaras de dos fases y se puede aplicar a los orujos extraídos y a los restos de poda y otros residuos agrícolas con el objetivo de disminuir la elevada humedad de los residuos y aumentar su poder calorífico.

Las preocupaciones ambientales a nivel mundial se orientan principalmente para un esfuerzo en la reducción de los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y consecuentemente para la reducción del efecto invernadero en el planeta y de todos los males de ahí resultantes. La bioenergía contribuye para la reducción de los niveles de CO<sub>2</sub>. Actualmente, los principales componentes contaminantes emitidos por las calderas o por los hornos de los secaderos son las micropartículas. La emisión de gases es muy baja y no causan problemas

ambientales. Las cenizas podrán ser objeto de estudio teniendo en cuenta la posibilidad de la elevada producción en el futuro. Actualmente, el aprovechamiento y la eliminación de los subproductos de la extracción del aceite son muy importantes no sólo para que las almazaras dispongan de infraestructura preparada, pero también debido a las graves repercusiones ambientales. Estas necesidades tenderán a aumentar porque las técnicas culturales aplicadas a los olivares van evolucionando y Portugal tendrá, a corto plazo, una producción bastante más elevada ya sea de aceite o sea de sus subproductos, debido a la posibilidad de plantar, por lo menos, 30000 hectáreas de olivar.

Actualmente, los proyectos están contribuyendo para que la UE se torne una economía eficaz, sostenible e inclusiva hasta 2020, tal como está definido en la estrategia de crecimiento de la UE 2020. La UE se encuentra ante desafíos de peso, como el envejecimiento de la población, insuficiente cualificación de los recursos humanos, la necesidad de mayor innovación, conseguir equilibrar el crecimiento económico y la degradación ambiental, bien como garantizar fuentes de energía limpias y seguras. Los proyectos de la política regional en toda la UE están desempeñando un papel activo en la gestión de estos y de muchos otros desafíos, a través de la implementación de proyectos concebidos para generar empleo, elevar los niveles de educación, desarrollar fuentes de energía renovables, promover la productividad y dar a todos los ciudadanos el acceso a oportunidades. Los proyectos y las regiones desempeñan un papel crucial en todo esto, dado que producen resultados reales que contribuyen para la concretización de los principales objetivos de esta estrategia.

La energía representa un importante factor productivo en la sociedad, principalmente en los servicios de transporte e industria. Esta representa la base del crecimiento económico y bienestar de la sociedad, y naturalmente, su consumo acompaña el crecimiento de la economía (EEA, 2008a). Actualmente, los combustibles fósiles se presentan como la fuente energética más utilizada en la producción de energía a nivel mundial, siendo el petróleo el combustible con mayor aplicación y cuyo consumo tiene presentado un incremento progresivo a lo largo de los años 1986 - 2010. Por otro lado, el carbón, el gas natural, los biocombustibles, y las restantes fuentes de energía, presentan una evolución uniforme para el mismo período. Este hecho está indicado en la figura 1 donde se presenta el consumo de energía primaria, por combustible, en el período de 1986 a 2010 (BP, 2011).

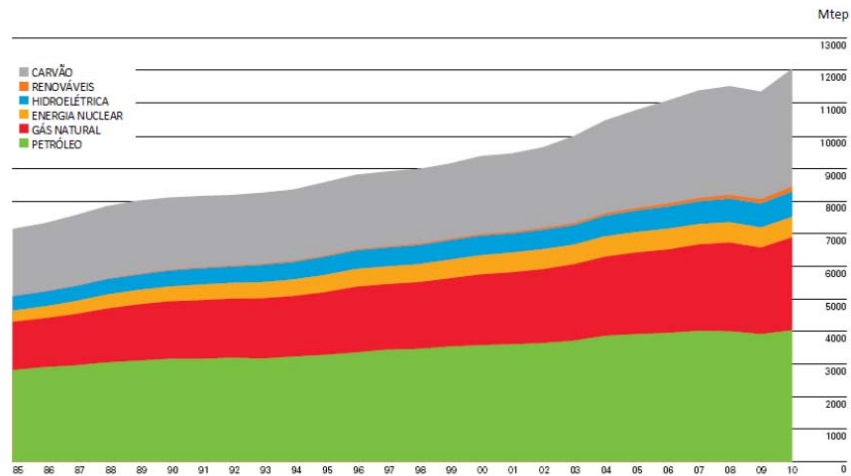


Figura 1. Consumo mundial de energía primaria por combustible, Mtep (fuente: BP, 2011).

A nivel europeo los 27 Estados Miembros de la Unión Europea (UE-27) se presentan hoy como el segundo mayor consumidor de energía del mundo, predominando el consumo de combustibles fósiles en su sector energético. Así, cerca del 78% de las necesidades energéticas de la media europea son satisfechas a través del carbón, del gas y del petróleo; cerca del 13,4% son satisfechas a través de la energía nuclear y los restantes 8,4% a través de fuentes de energías renovables (EEA, 2011a) (figura 2).

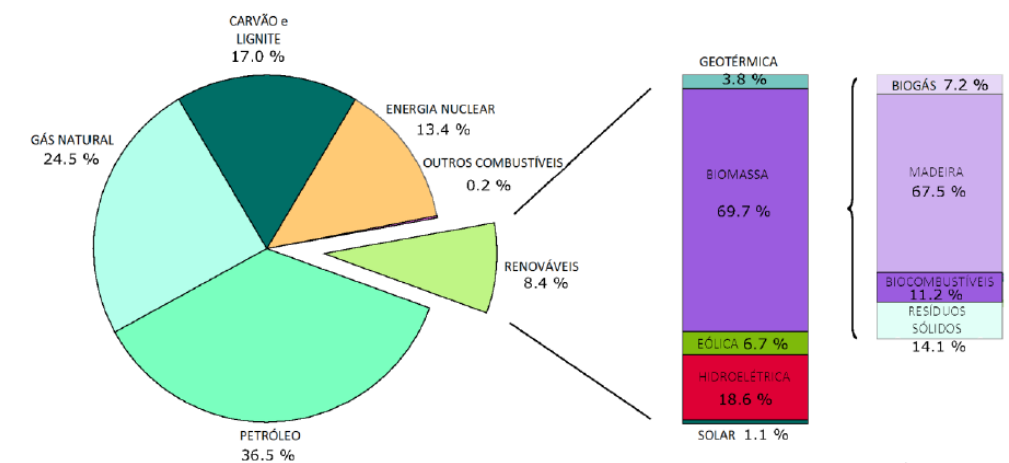


Figura 2. Consumo total de energía primaria de la UE-27, por fuente de energía en 2008 (fuente: EEA, 2011a).

El aumento de la búsqueda de energía primaria presenta repercusiones económicas y sociales significativas. Actualmente la Unión Europea (UE) depende en cerca del 50% de fuentes externas en el ofrecimiento de energía y podrá, hasta 2030, aumentar su dependencia cerca del 70% (EEA, 2011a), (EEA 2011f). Esta situación, además de los problemas asociados a la sustentabilidad y a la seguridad del abastecimiento energético, estimula importantes tensiones geopolíticas entre países productores y países dependientes de la energía (CCE, 2007). Relativamente al panorama nacional, y como resultado de los escasos recursos energéticos fósiles endógenos, Portugal se presenta fuertemente dependiente de recursos energéticos importados, con valores de dependencia energética de cerca del 81,2% (expresa mayoritariamente en combustibles fósiles) y de importación de energía primaria del orden del 96%, en 2009. Al final de 2010, la potencia total instalada a nivel nacional era de cerca de 17920 MW, repartidos por centrales termoeléctricas, con una potencia de 7407 MW, centrales hidroeléctricas con 4 578 MW, y centrales de recursos renovables, cuya potencia correspondía a 5935 MW (REN, 2011). En este mismo año, la producción bruta de energía eléctrica fue de 52204 GWh año<sup>-1</sup>, fue asegurada por el funcionamiento de varias centrales, cabiendo las térmicas 33% del abastecimiento del sistema por la quema de combustibles fósiles. La restante producción de energía fue satisfecha por la producción de origen hidráulica (28%) y por otras fuentes (34%), tales como la energía de la biomasa, la energía eólica, la energía geotérmica y la energía fotovoltaica. La figura 3 presenta la distribución de diversas fuentes de producción de energía eléctrica para el año 2010 (REN 2011).

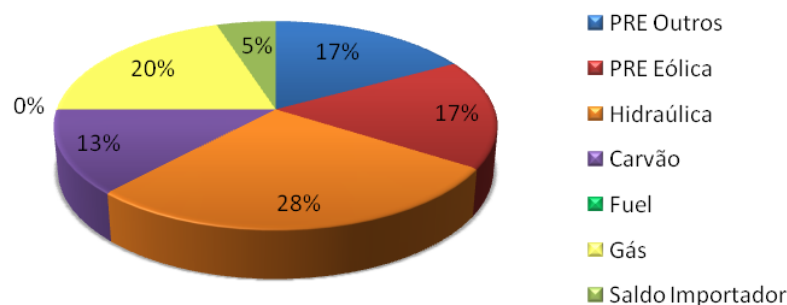


Figura 3. Distribución de la Producción de Energía Eléctrica en Portugal en el año 2010 (fuente: REN, 2011).

Los actuales patrones de producción y consumo de energía no son sostenibles, habría que encontrar un mejor equilibrio entre los tres principales vectores de la política energética: la seguridad del abastecimiento energético, el desenvolvimiento económico y la protección del ambiente. Así de cara a los diversos y significativos impactos ambientales que le están asociados, principalmente el incremento del efecto invernadero, el agotamiento de la capa de ozono, las lluvias ácidas, y la polución fotoquímica, la energía se presenta como el mayor desafío global del presente siglo. En este contexto, la polución atmosférica, y en particular las alteraciones climáticas, vienen a ser identificadas como una de las mayores amenazas ambientales, sociales y económicas que el planeta y la humanidad enfrentan en la actualidad.

Así la figura 4 presenta las emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la UE-27 en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente per cápita (EEA, 2011c). El análisis de la totalidad de emisiones de GEI por habitante revela que Portugal en 2009 poseía una de las más bajas capitaciones entre los países de la UE-27, donde el valor fue del orden de 7,5 toneladas de CO<sub>2</sub> por habitante, que correspondió al séptimo lugar como se muestra en la figura 4. Sin embargo, Portugal se presentó como el tercer país de la UE-27 a aumentar su capitación de GEI, de cara a los valores de 1990 con un valor del 40 % por encima de la media, situación que revela la gran disparidad existente en el inicio de los años 90 entre la estructura económica y la organización de Portugal de cara a la mayoría de los países europeos, y el fuerte crecimiento y alteraciones profundas de la sociedad verificados a nivel nacional después de la adhesión a la UE.

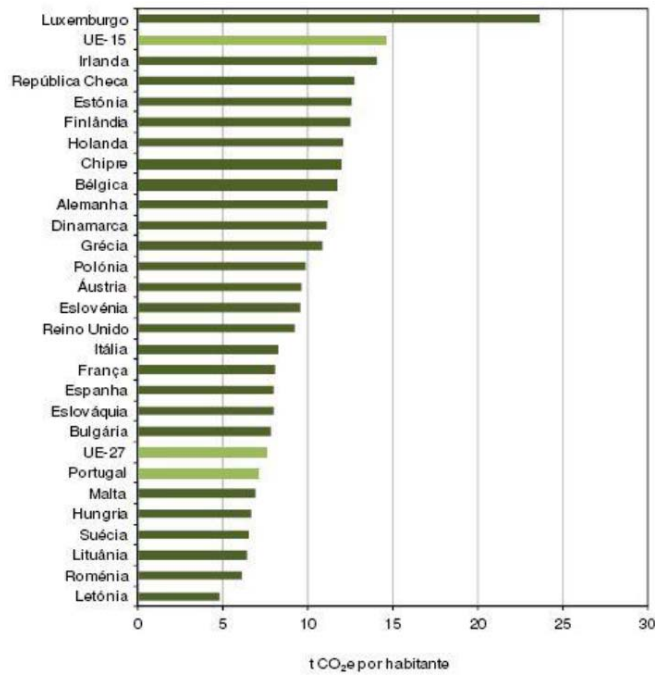


Figura 4. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la UE-27, tonelada CO<sub>2</sub> equivalente per cápita (fuente: EEA, 2011c).

En 2008 el sector de la producción de energía y transporte se consideraron como los principales responsables por la emisión de GEI en Europa, correspondiendo a un porcentaje del 50% del total de las emisiones. El restante del porcentaje se encuentra repartido en el sector de la industria, de los servicios, de la agricultura, de los residuos, y por las emisiones fugitivas (figura 5) (EEA, 2011d).

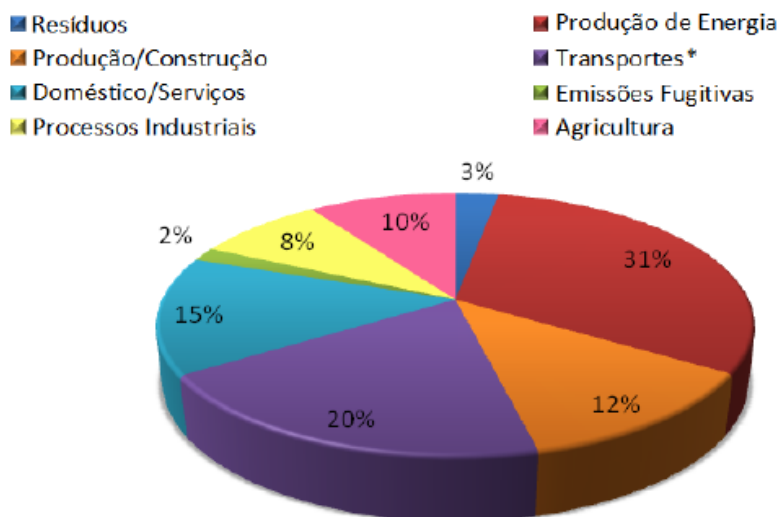


Figura 5. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la UE-27, por sector en el año 2008 (Fuente: EEA, 2011d).

Respecto al panorama nacional, y según la Agencia Portuguesa del Ambiente (APA, 2011) en el período 1990 - 2009, las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, los tres principales GEI, crecerán a un ritmo medio de 1,3% por año, situándose en 2009 cerca del 1% bajo la meta nacional de cumplimiento en el ámbito del Protocolo de Kioto (27%), con un valor de aproximadamente 74,6 Mt CO<sub>2</sub> equivalente. Siguiendo la tendencia europea, el sector de la producción de energía, incluyendo el transporte, se mantuvo en 2009 como el principal sector responsable por las emisiones de GEI, representando el 73% de las emisiones nacionales y presentando un crecimiento de cara a 1990 en cerca del 33%. Para el mismo período, el sector del transporte siendo fuertemente dominado por el tráfico de la carretera, fue uno de los sectores que presentó mayor crecimiento de emisiones (87%), verificándose actualmente una cierta estabilización/reducción de estas emisiones. Por otro lado, las emisiones provenientes de la producción y transformación de energía aumentaron cerca del 23%, siendo este el principal sector responsable por las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estas tendencias son el reflejo del fuerte crecimiento económico registrado en la década de los 90, asociado a un aumento de la búsqueda de energía y de la movilidad y caracterizado por un padrón de producción y consumo de energía fuertemente dependientes de la quema de combustibles fósiles.

De este modo, las alteraciones climáticas deben ser encaradas como un multiplicador de amenazas que exagera las tendencias, tensiones e inestabilidad existentes. El principal desafío reside en el hecho de que las alteraciones climáticas amenazarán con sobrecargar estados y regiones que ya de sí son frágiles y susceptibles a conflictos. Importa reconocer que los riesgos no son sólo de carácter humanitario; se trata igualmente de riesgos políticos y de seguridad que afectan directamente a los intereses europeos. Además, de armonía con el concepto de seguridad humana, es obvio que muchas de las cuestiones relacionadas con el impacto de las alteraciones climáticas en la seguridad internacional están ligadas y requieren respuestas políticas correctas.

Sin embargo tenemos que resaltar, que muchos impactos podrán ser evitados, reducidos o atrasados a través de medidas de mitigación y de un conjunto de medidas de adaptación, principalmente a través de la regularización de las actividades humanas y de una estrategia de adaptación a los efectos de las alteraciones climáticas en el territorio y en la salud humana. Confrontar las alteraciones climáticas es, por tanto, un doble desafío: atacar el

origen del problema, o sea, las emisiones de gases de efecto invernadero, y preparar las sociedades de todo el mundo para negociar con los impactos biofísicos y socioeconómicos de las alteraciones del clima (Resolución del Consejo de Ministros n.º 24/2010).

### **1.5 Preparación y secado térmico de residuos**

La preparación de residuos, a través de diferentes procesos tales como el astillado, la trituración, el secado, etc. tiene por objeto facilitar los procesos de transporte, almacenamiento y la subsecuentemente combustión.

#### **1.5.1 Definición y objeto del secado**

El proceso de secado es un proceso de transferencia de calor y masa a través del cual un producto es pasado a partir de un estado inicial con un cierto grado de humedad para otro estado final con menos humedad, de modo a obtener un producto inicial diferente.

El agua contenida en el producto, puede ser encontrada inherente (que forma parte de la estructura molecular del producto) o añadida (como resultado de un proceso de lavado o una precipitación involuntaria sobre el producto). Reduciendo la humedad se obtienen mejores características de combustible (elevado PCS y bajo porcentaje de humedad, ya que ambas propiedades son inversamente proporcionales).

La operación de secado puede ser considerada como una operación energética elemental y especialmente como una de las operaciones térmicas básicas de la industria. Los principales objetivos pretendidos con las operaciones de secado son: facilitar un proceso industrial a través de la utilización satisfactoria de un producto, mejora del rendimiento de la instalación y reducir los costes (en almacenamiento, transporte y conservación del producto).

#### **1.5.2 Características de los residuos de biomasa a desecar**

Las principales características a considerar son:

- Tamaño de las partículas para secar: cuanto más finamente dividida se encuentra la biomasa, más fácil será su secado.

- Naturaleza de la humedad contenida: dependiendo de que el agua se encuentre en forma de líquido puro o en disolución.
- Modo de fijación de la humedad; es decir, la manera por la cual la humedad está relacionada a la materia seca. Existen dos tipos:
  - Líquido adherente: el líquido está en forma de película sobre la superficie exterior de la biomasa.
  - Líquido capilar: el líquido es retenido en los intersticios de la biomasa.

### 1.5.3 Períodos, duración y fases del secado

Dentro del proceso de secado distinguimos, en teoría, tres períodos:

Período 1: Aumento de la temperatura del producto a desecar.

Período 2: Evaporación superficial de agua adherente.

Período 3: Fase final de secado.

La aportación del Período 1 es grande en productos de dimensiones considerables e incide fuertemente en el diseño y elección de un secadero.

El período 2 existe mientras tenga lugar el proceso de evaporación hasta un punto de “contenido crítico del agua”. En este período la velocidad de secado es constante.

El secado en el período 3 disminuye debido a la ausencia de agua adherente sobre la superficie.

La velocidad del secado se define como la variación de la humedad con respecto del tiempo:

$$V = dH/dt,$$

Donde:

H = humedad del producto o residuo

t = tiempo

En conjunto, la temperatura del residuo se aproxima a la del aire o a la del gas

desecante, alcanzándola en un determinado período de tiempo como se representa en la figura 6.

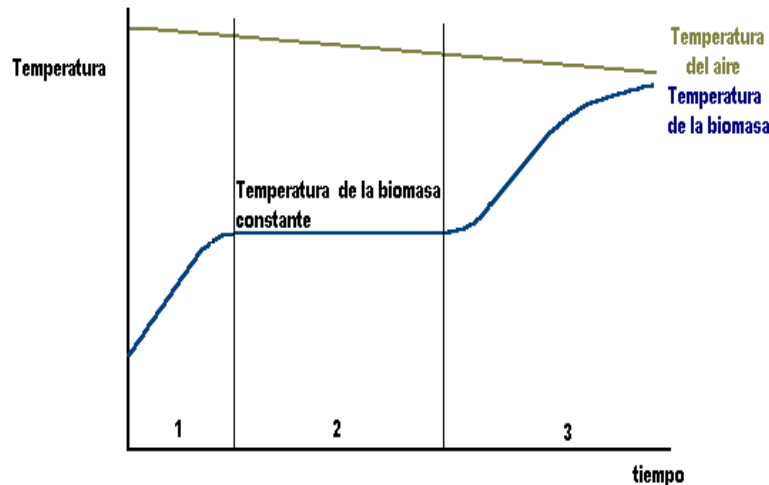


Figura 6. Evolución de la temperatura de la biomasa durante el secado.

Como conclusión, las variables fundamentales del secado son:

- La velocidad de secado de la biomasa;
- Las temperaturas en cada fase;
- La duración del secado (tiempo de cada período);
- La eficacia del secado (contenido en humedad final respecto a la humedad inicial de la biomasa);
- La energía consumida;
- La velocidad del aire o fluido secadero;

Que estas variables vienen determinadas por el tipo de biomasa a desecar (higroscopicidad, forma, presentación, utilización, etc.) en cada fase del proceso de secado y las distintas dificultades existentes en cada fase para liberar el agua retenida.

### 1.6 Tipos de secaderos.

Existe una amplia gama de secaderos; esto se debe a la gran variedad de productos para ser tratados y las condiciones impuestas por el producto a secar, del fluido secadero y del material de composición del secadero.

Las variables utilizadas para clasificar y analizar los secaderos son:

- Tipo de propagación de calor (convección, conducción y radiación).
- Presión utilizada en el proceso (normal o vacío).
- Movimiento del producto (base fija, base móvil, gravedad, etc.).
- Corriente de secado (paralela, contracorriente, cruzadas, etc.).
- Aportación de calor (continua, discontinua, de caldera de vapor, directa con fuel, etc.).
- Técnicas especiales en cada caso (bandejas, cilindros, tambores, túneles, bandas, etc.).

Teniendo en cuenta el proceso de secado y el tipo de movimiento del producto, se describen a continuación los diferentes tipos de secaderos térmicos.

### 1.6.1 Estufas de secado

La estufa de secado representa la construcción más simple de secadero y su forma típica para los productos agrícolas. La biomasa se extiende sobre una bandeja, tamiz o malla permeable al aire. El movimiento del aire de secado es llevado a cabo con o sin ventilador. Después de cortar el flujo de aire, la biomasa se mezcla a través de un agitador mecánico. Para obtener una alimentación regular del tablero perforado, la superficie de la estufa está dividida en varios compartimentos donde el aire llega separadamente (figura 7).

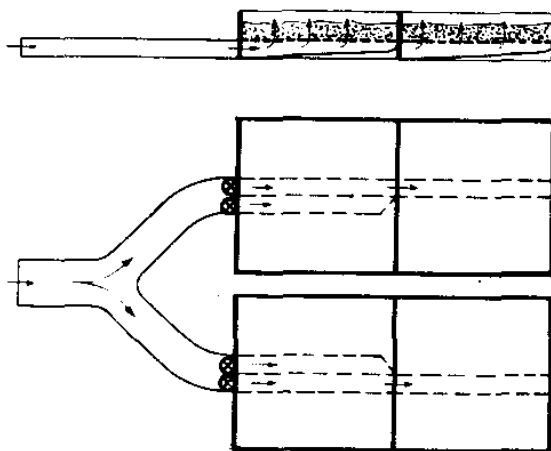


Figura 7. Estufa de secado de grano (Fuente: Kneule, 1984).

### 1.6.2 Estufas de tambor.

Su utilización se encuentra principalmente en el secado de la biomasa forestal. El tambor, retira automáticamente la misma y la vacía después de la conclusión del secado de acuerdo al proceso de rotación en sentido inverso. Con ayuda de una compuerta de regulación, colocada en la chimenea de salida del aire, puede dirigirse el aire de secado de forma que éste se realice con el aire de recirculación, mixto o fresco.

La temperatura y humedad del aire de secado se puede regular entre amplios límites. El vapor para el calentamiento del aire se regula a través de una válvula de mando térmico. La duración del secado se ajusta tanto a la velocidad de rotación del tambor como a las condiciones requeridas por la variación de la temperatura y la velocidad del aire (figura 8).

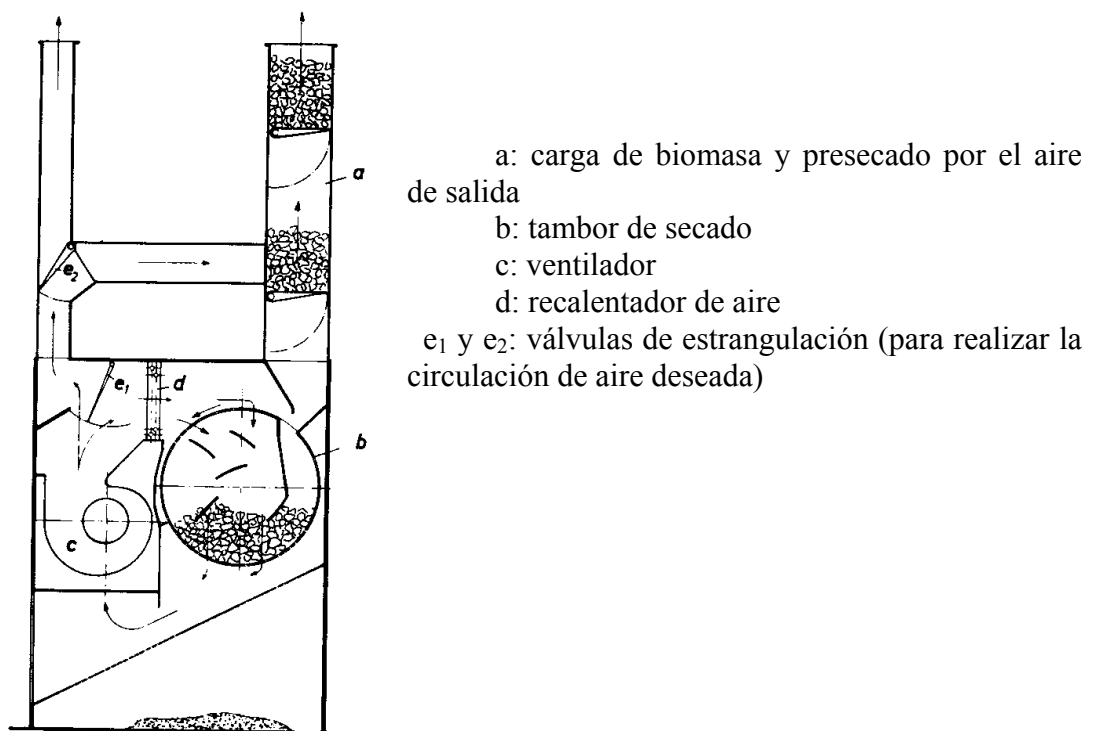


Figura 8. Estufa de tambor para el secado de paja (Fuente: Kneule, 1984).

### 1.6.3 Turbosecaderos

Este tipo de secadero está formado por elementos superpuestos, cada uno de ellos formados por un conjunto de segmentos espaciados. El producto se carga sobre los segmentos del primer elemento superior, y después de una rotación de  $160^\circ$ , un rastrillo fijo hace que caiga sobre un sector del elemento inferior, donde es uniformemente distribuido. Así sucesivamente hasta la salida (figura 9).

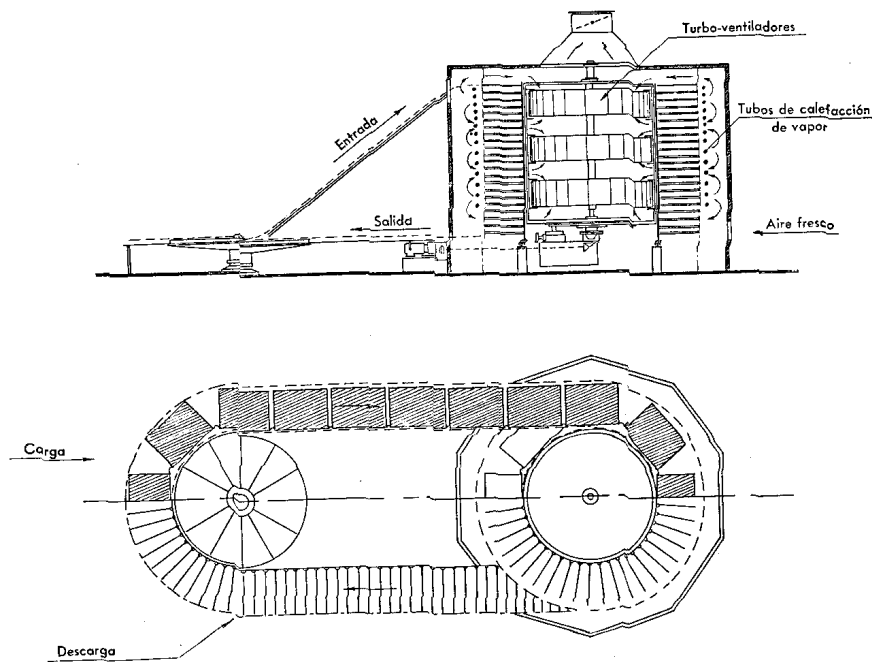


Figura 9. Esquema de turbosecadero de cinta continua (Fuente: Kneule, 1984).

El aire necesario para la desecación es aspirado por abajo y después impulsado radialmente entre los elementos anulares, en una rotación más o menos lenta, por una serie de turboventiladores. Los radiadores dispuestos contra la pared hacen que el aire al tropezar con ellos eleve su temperatura y las mantenga, hasta el momento de ser cargado de humedad en lo alto del secadero. El aire puede venir ya caliente desde abajo, y su temperatura modificarse convenientemente en determinadas zonas. La figura 10 muestra la imagen de este tipo de secadero.

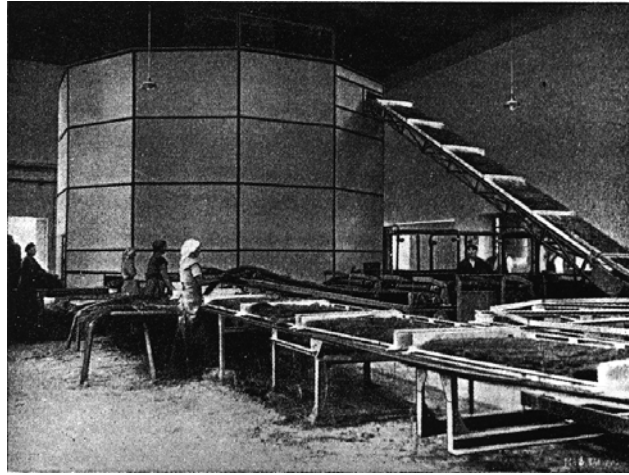


Figura 10. Turbosecadero de cinta helicoidal (Fuente: Kneule, 1984).

#### 1.6.4 Canal de secado.

Este tipo de secadero se usa cuando las cantidades de producto a secar son elevadas. El producto se deposita en remolques que avanzan a través del canal, recorrido por un agente de secado. La ventilación se efectúa longitudinal o transversalmente con respecto al movimiento de transporte y la circulación del aire en corriente paralela (figura 11) o en contracorriente (figura 12).

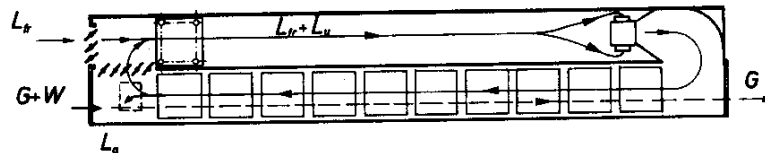


Figura 11. Canal de secado en corriente paralela.

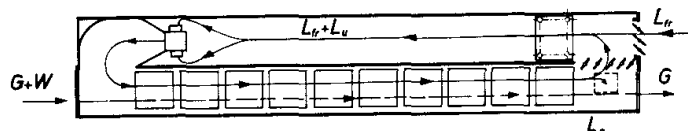


Figura 12. Canal de secado en contracorriente (Fuente: Kneule, 1984).

### 1.6.5 Secaderos de tambor.

Los secaderos de tambor están formados por un cilindro tubular inclinado que gira en torno a su eje longitudinal. El producto húmedo se lleva al extremo más elevado del tambor a través de un sistema de carga. Gracias a la lenta rotación del tambor, se produce la mezcla del producto; y debido a la pendiente del tambor se facilita la salida del producto por la tolva de evacuación. El agente de secado, que puede ser el aire caliente o el gas, se introduce en el tambor en paralelo o en contracorriente con el sentido de avance del producto en el interior del tambor. (figura 13).

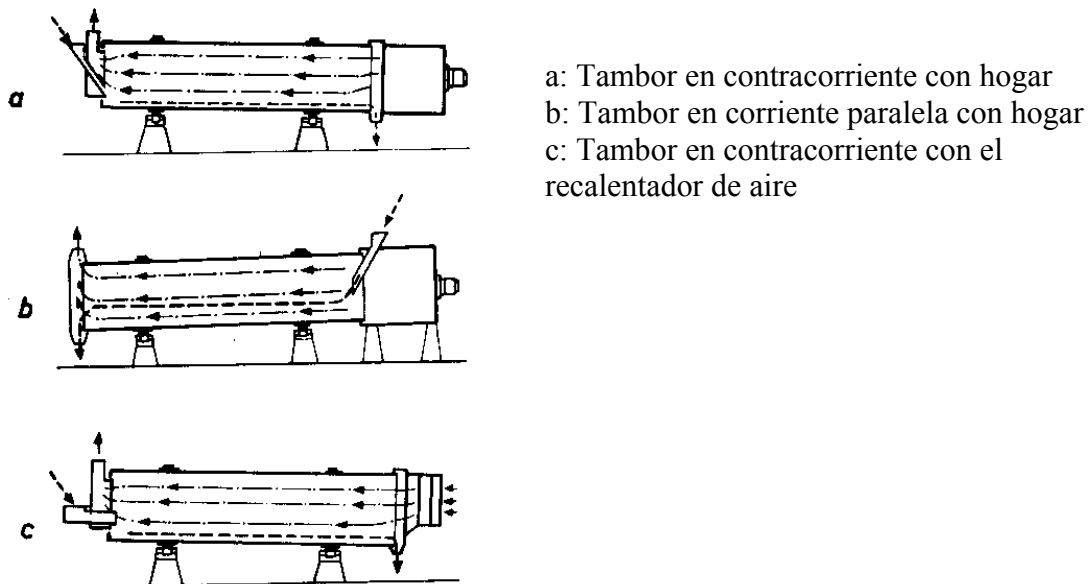


Figura 13. Circulación de los gases en un secadero de tambor (Fuente: Kneule, 1984).

Según el tipo de circulación del agente de secado, se tiene:

- Transmisión directa de calor: el producto está en contacto directo con el medio desecante. Secado por convección. En paralelo o en contracorriente.

- Transmisión indirecta de calor: el calor se transmite a través de superficies, tanto a través de la pared del tambor, como por los tubos de vapor o de gas caliente colocados en el interior.
- Calentamiento combinado: los gases calientes ceden parte de su calor en primer lugar a superficies que se encuentren en contacto con el producto y después circulan directamente sobre la superficie del producto.
- Cuando no exista inconveniente en que el producto y el gas estén en contacto, se optará por la transmisión directa del calor, debido a su sencillez y para mayor aprovechamiento de este. (Figura 14).

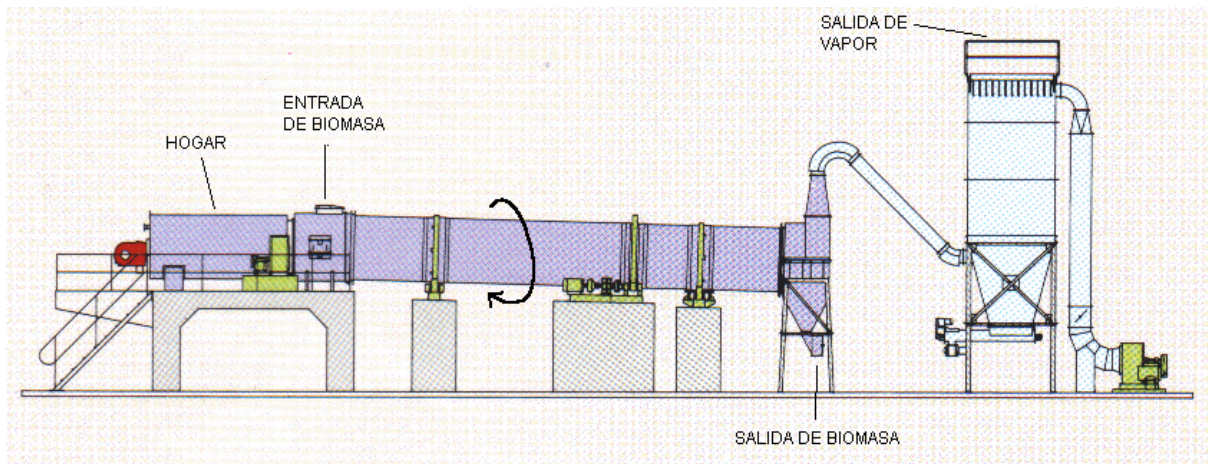


Figura 14. Secadero de tambor directo (Fuente: INGETECSA)

Cuando se quiere conseguir la misma transmisión de calor pero en menor longitud, se recurre a los secaderos de doble paso.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 Caracterización de los residuos estudiados

Se ha realizado el análisis inmediato (directo), análisis elemental, análisis de la composición de cenizas y la determinación del poder calorífico superior (PCS) de diferentes residuos de la zona de Alentejo.

Los residuos de Alentejo caracterizados han sido siete muestras (orujo de uva, residuo de miscanthus, residuo de la cáscara de café, poda (sarmiento), orujo de aceituna, residuo del corcho; polvo, corteza y cáscara, y residuos del eucalipto) tal como se muestra en las figuras 15-21.



Figura 15. Muestra de orujo de uva.



Figura 16. Muestra de residuo de miscanthus.



Figura 17. Muestra de residuo de cáscara de café.



Figura 18. Muestra de poda (sarmiento).



Figura 19. Muestra de orujo de aceituna.

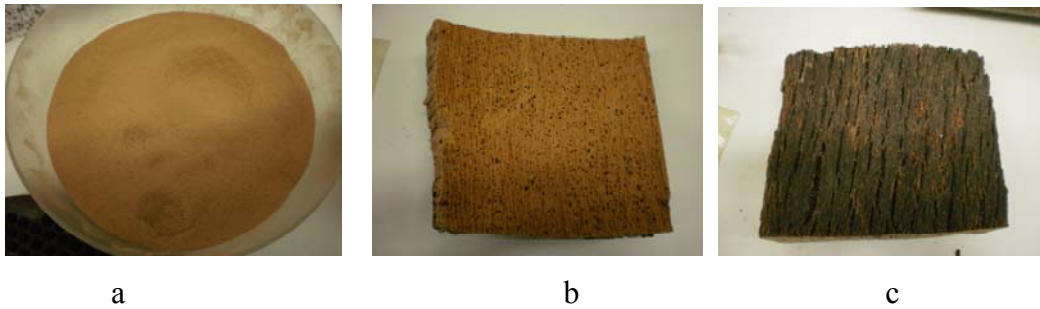


Figura 20. Muestra de corcho: (a) polvo (b) corteza (c) cáscara.



Figura 21. Muestra de residuos de eucalipto.

### 2.1.1 Análisis inmediato

El objetivo del procedimiento en este apartado ha sido realizar el análisis inmediato de la biomasa residual, que comprende la determinación del contenido de humedad, cenizas, materias volátiles y carbono fijo que contiene la misma, para poder comprobar su uso como posible combustible.

#### 2.1.1.1 Fundamentos teóricos

**HUMEDAD:** Es la cantidad de agua, expresada en tanto por ciento en peso, que contiene un combustible.

**CENIZAS:** Es el residuo sólido, expresado en tanto por ciento en peso, resultante de la combustión completa de un combustible.

**MATERIAS VOLÁTILES:** Se entiende por materia volátil el porcentaje de pérdida de peso que sufre un combustible (libre de humedad) al calentarlo en una atmósfera inerte durante 7 minutos a 900°C.

**CARBONO FIJO:** Entendemos por carbono fijo la materia combustible, expresada en tanto por ciento, propiamente dicha que contiene un combustible.

Todo con un objetivo fundamental, que es conocer a través de dichos análisis la calidad energética del producto de combustibles sólidos y la idoneidad de la misma como posible combustible a la hora de ser utilizada en proyectos reales a mayor escala. Para ello debemos tener en cuenta que, un buen combustible se caracteriza por una serie de cualidades entre las que se encuentran:

- Bajo porcentaje de humedad.
- Elevado Poder calorífico superior (PCS).
- Bajo contenido en cenizas.
- Elevado contenido de carbono fijo.
- Baja presencia de azufre en su composición elemental.

#### **2.1.1.2 Determinación de la humedad**

A través de este parámetro se determina la cantidad de agua, expresada en tanto por ciento en peso, que se encuentra contenida en el combustible. Al igual que ocurre con el contenido en cenizas, la cantidad de humedad que pueda contener un combustible está en relación inversa con su calidad, es decir, valores reducidos de humedad indican que el combustible es de mayor calidad. También es posible considerar la humedad total contenida en un combustible como integrada por dos tipos diferentes como son; la humedad libre o añadida, que es el agua unida superficialmente al combustible como consecuencia del lavado o por su exposición a los agentes atmosféricos externos, la cual es posible eliminar mediante un simple proceso de secado y aireación y, por otro lado, la humedad inherente, que es el agua contenida en el combustible inicialmente y que permanecerá en equilibrio con la humedad ambiente. Es ésta la humedad que se eliminará en el desarrollo del proceso:

- 1- Se utilizan cápsulas bien limpias, en un horno o estufa durante varios minutos a la temperatura de 105-110°C, y se pesan sin tapadera (la pesada de la cápsula se realiza en caliente para evitar la absorción de humedad durante el enfriamiento).
- 2- Se añade de forma uniforme en el fondo de cada cápsula, la cantidad de muestra cuya humedad queremos determinar.
- 3- Se introduce el conjunto cápsula más muestra en un desecador hasta justo antes de introducirlo en la estufa. Cuando la estufa se encuentre a una temperatura comprendida entre 105 y 110°C, se introduce la cápsula más la muestra, permaneciendo en el interior de la estufa durante una hora (tiempo que se considera necesario para que la masa de muestra en la cápsula no varíe y permanezca constante), de todas formas, lo que se hace para asegurarse de que la masa de muestra no varía y se mantiene constante es, en primer lugar sacarla a la hora de permanencia y posteriormente cada 30 minutos, realizando las pesadas que sean necesarias hasta que la diferencia entre pesada y pesada sea inferior a 1 mg, momento en el cual las sacamos de la estufa para determinar la masa de las cápsulas con las muestras secas (hay que tenerlas siempre en el deshidratador al sacarlas del horno).
- 4- Para terminar pesamos el conjunto cápsula más muestra obteniendo los datos que se recogen, a modo de ejemplo, en la Tabla 2.

A partir de estos datos se ha obtenido el valor medio de la humedad contenida en la muestra analizada.

#### Cálculos y resultados de la humedad:

Para determinar de forma experimental el contenido medio de humedad, en tanto por ciento, a partir de las muestras analizadas, se aplica la expresión (1):

$$h(\%) = \frac{m_5 - m_6}{m_5 - m_4} \cdot 100 \quad (1)$$

donde:

- $m_4$  = masa en gramos de la cápsula vacía y seca.
- $m_5$  = masa en gramos de cápsula y muestra, antes de ser calentada en la estufa.
- $m_6$  = masa, en gramos, de la cápsula y la muestra después del calentamiento.

La dispersión porcentual se calcula de acuerdo con la expresión (2):

$$T = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h} \quad (2)$$

Los valores de masa obtenidos y los datos experimentales obtenidos para estos valores aplicando las expresiones (1) y (2) se resumen, a modo de ejemplo, en la Tabla 2.

Tabla 2. Masas determinadas y valor de humedad inicial del combustible.

	<b>Muestra 1 (g)</b>	<b>Muestra 2 (g)</b>	<b>Muestra 3 (g)</b>
m <sub>4</sub>	21,1019	18,5864	17,8119
m <sub>5</sub>	22,1055	19,5931	18,8130
m <sub>6</sub>	22,0362	19,5220	18,7422
<i>h<sub>m</sub></i> (contenido medio de humedad)	6,976%		
<i>T</i> (Dispersión porcentual)	0,020%		

También se han determinado las humedades del combustible durante los ensayos de secado del orujo de aceituna utilizando otra técnica más rápida usando el analizador mostrado en la figura 22. Este equipo es un analizador halógeno de humedad (DBS 60-3 KERN), sus características se muestran a continuación:

- Luz halógena de vidrio de cuarzo 400 vatios.
- Pantalla LCD retroiluminada, altura de dígitos 15 mm: Tiempo de secado previo, temperatura actual, unidad para visualizar los resultados, contenido en humedad actual en %, niveles de desecación/Indicación de estado desecación.
- Mirilla para poder ver las muestras, muy útil al realizar el ajuste inicial.
- Memoria interna para la ejecución automática de 10 programas de desecación y 100 procesos de secado realizados.
- El último valor medido permanece en pantalla hasta que sea sobrescrito por un nuevo valor de medición.

Especificaciones:

- Precisión: 0,001 g/0,01 %
- Margen de pesada max: 60 g
- Reproducibilidad en las pesadas 2 g: 0,15 %

- Reproducibilidad en las pesadas 10 g: 0,02 %
- Margen de temperatura: +50 a +200°C
- Medidas (ancho x largo x alto): 202 x 336 x 157 mm



Figura 22. Analizador halógeno de humedad de los residuos (KERN DBS 60-3).

### 2.1.1.3 Determinación del contenido en cenizas

Las cenizas son el residuo sólido, expresado en % en peso, resultante al producir la combustión completa del combustible. Las cenizas se pueden clasificar en dos tipos: cenizas inherentes (proceden de las materias sólidas no combustibles contenidas en los vegetales que dan origen a los combustibles) y cenizas añadidas o adventicias (las cuales han sido añadidas a través de la manipulación del combustible en el proceso de extracción).

Sabemos que cuanto mayor sea el contenido en cenizas, menor es la calidad del combustible, además las cenizas perjudican la combustión ya que producen la formación de escorias (estas presentan un elevado poder corrosivo, en ocasiones son difíciles de extraer del hogar e incluso, en aquellos casos en los que su punto de fusión sea bajo, pueden dificultar y reducir la entrada de aire primario en el hogar, reduciendo la eficiencia de la combustión) por tanto, es importante tener un combustible en el que el contenido en cenizas sea reducido y el punto de fusión de las mismas sea elevado.

Para la determinación de este parámetro, se siguió el siguiente proceso:

1- Se pesaron las tres cápsulas y sus tapaderas, limpias y secas, y se le añadieron las muestras del combustible analizado de tal forma que antes de introducirlas en un horno mufla marca Hobersal (figura 23) se vuelve a pesar todo el conjunto (cápsula + tapa + muestra de carbón).

2- Se introduce la cápsula con la muestra en el horno mufla, sin tapa, a temperatura ambiente, de tal forma que se elevará la temperatura gradualmente en diferentes intervalos. Primero, en un tiempo de 30 minutos, se pasa a una temperatura de 250°. En los 30 minutos siguientes se sigue elevando la temperatura hasta los 500° y por último, se llega a una temperatura de 815° durante otros 30 minutos. Una vez pasados esos 30 minutos, se deja permanecer la muestra a la temperatura de 815° durante una hora más.

3- Cuando finalice este proceso, se retira la cápsula del horno y se cubre con la tapa, dejándola enfriar durante 10 minutos sobre una placa metálica o de mármol.

4- Por último, se introduce la cápsula tapada en un desecadero provisto de un agente anhidro (agente deshidratante) durante 15 minutos, y posteriormente se pesa de nuevo el conjunto cápsula + tapadera + cenizas, con la precisión de 0,1 mg.

5- Para terminar, se vuelve a calentar la cápsula con las cenizas y sin tapa a 815°C durante 15 minutos, para después volver a enfriar de la misma forma a como lo hicimos antes. Como resultado, pesamos de nuevo el conjunto cápsula + tapadera + cenizas.

Los resultados se resumen en la Tabla 3, y a partir de ellos se obtiene el valor medio del contenido en cenizas.



Figura 23. Horno mufla para quemar los residuos y obtener cenizas (Hobersal).

Las características principales del horno mufla (Hobersal) son:

Horno para laboratorio para simular la curva de cocción de un horno industrial continuo.

Los ciclos de calentamiento y enfriamiento son relativamente cortos.

Este modelo de horno está diseñado técnicamente con los más avanzados tipos de fibras aislantes y elementos de calorifugación de mercado actual, lo cual le permite obtener una escala de temperatura muy elevada en un tiempo notable más corto que el resto de hornos de mercado construidos con refractario convencional.

Posee asimismo un perfecto aislamiento térmico y sin inercias apreciables al eliminar en la construcción de la cámara interna, (lateral, techo y fondo), el refractario de tipo cerámico a excepción de la solera fabricada con refractario de Alta Temperatura de muy alto grado de contenido de Alúmina y punto de fusión, permitiendo la introducción de piezas, crisoles, muestras u objetos de cierta consistencia y peso sin peligro de hundimiento o resquebrajamiento de la misma.

Las placas de fibra que forman los laterales y techo de la cámara se apoyan y están ancladas sobre una doble cámara de placas refractarias cerámicas del mismo tipo que la placa de soleras.

El horno lleva incorporado un equipo de enfriamiento formado por una turbina exterior, conductos y chimeneas. La regulación se efectúa a través de un programador de rampas con microprocesador con un total de 9 programas de 35 segmentos parámetros PID, alarma mediante la cual se regula automáticamente el calentamiento y enfriamiento rápido del horno.

Exteriormente caja metálica con protección cromo-fosforante y acabados exterior con pintura metálica resistente al calor.

Tiene dispositivos de seguridad: (desconexión del horno por rotura de termopar) (desconexión del horno al abrir la puerta).

## DATOS TECNICOS

- Temperatura máxima de funcionamiento: 1500°C en punta durante tiempo limitado.
- Temperatura régimen continuo de trabajo: 1400°C.
- Aislamiento: Fibra de 25 y 50mm espesor en cara caliente cámara M-160.
- Control Temperatura: Programador de rampas 9 programas de 35 segmentos (entrelazables)
- Elementos calefactores tipo super kanthal, conexión en un solo extremo situadas en ambos lados y en la parte central.
- Aislamiento exterior: por doble cámara con circulación forzada de aire.
- Regulación potencia: Equipo Triac y transformador bajo voltaje.

### Medidas de la cámara interior:

- Alto: 200mm Alto: 600mm
- Ancho: 200mm Ancho:1000mm
- Fondo: 300mm Fondo: 600mm
- Voltaje: 220V

### Cálculos y resultados de cenizas:

Para determinar de forma experimental el tanto por ciento de contenido en cenizas, “c”, de cada una de las tres muestras analizadas se utiliza la expresión (3):

$$c(\%) = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \quad (3)$$

donde:

- $m_1$  = masa en gramos de la cápsula vacía con su tapadera.
- $m_2$  = masa en gramos de la cápsula con su tapadera y la muestra, antes de ser introducida en el horno de mufla.
- $m_3$  = masa en gramos de la cápsula con su tapadera y el residuo que queda una vez sacada del horno.

Los valores determinados aplicando la expresión (3) se expresan, a modo de ejemplo en la Tabla 3, y el porcentaje del error se obtiene de la expresión (4):

$$T = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{c} \quad (4)$$

Tabla 3. Resumen de los datos del combustible (análisis del contenido en cenizas).

	<b>Muestra 1 (g)</b>	<b>Muestra 2 (g)</b>	<b>Muestra 3 (g)</b>
m <sub>1</sub>	14,5718	14,6668	14,4621
m <sub>2</sub>	15,5801	15,6784	15,4703
m <sub>3</sub>	14,5763	14,6730	14,4711
c <sub>m</sub> (Contenido medio en cenizas)	0,6506%		
T (Porcentaje del error)	0,6861%		

#### 2.1.1.4 Determinación de materias volátiles

Para determinar el contenido en materias volátiles de las muestras que se han analizado, lo que se ha realizado ha sido determinar el porcentaje de pérdida de peso que se produce en las mismas al calentarlas en atmósfera inerte (es decir, en ausencia de oxígeno o de cualquier otro oxidante) a la temperatura de 900°C durante un tiempo exacto de 7 minutos, por tanto, el procedimiento que se ha seguido ha sido el siguiente:

1- Calentamiento de las tres cápsulas vacías con sus tapaderas en un horno de mufla a una temperatura de 900°C durante 7 minutos. Después se han dejado enfriar y se han introducido en el desecador, para posteriormente determinar la masa de cada crisol, una vez frío y en ausencia de humedad.

2- Se añade en cada cápsula una cantidad de muestra cuyo contenido en materias volátiles se va a determinar y se pesa el conjunto cápsula + tapadera + muestra.

3- Se introducen, otra vez, en el horno de mufla los crisoles tapados y con la muestra en su interior, a la temperatura de 900°C durante 7 minutos, al cabo de los cuales, se sacan los crisoles, se espera a que se enfríen y se introducen en el desecador.

4- Finalmente, se pesa todo el conjunto una vez que se encuentre totalmente frío y se obtiene, por diferencia con la anterior pesada, la cantidad de materias volátiles que se han desprendido de la muestra analizada.

Cálculos y resultados de materias volátiles:

Para determinar de forma experimental el tanto por ciento de contenido en materias volátiles, “v”, de cada una de las tres muestras analizadas se utiliza la expresión (5):

$$v(\%) = \left( \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 \right) - h \quad (5)$$

donde:

- $m_1$  = masa en gramos de la cápsula vacía y su tapadera, limpios y secos.
- $m_2$  = masa en gramos de la cápsula su tapadera y la muestra, antes de ser introducida en el horno de mufla.
- $m_3$  = masa en gramos de la cápsula su tapadera y la muestra tras el calentamiento, es decir, desprovista de humedad y materias volátiles.
- $h$  = humedad, en % de la muestra, previamente determinada.

Los valores de masa expresados anteriormente se resumen en la Tabla 4, a modo de ejemplo. El porcentaje de error se obtiene de la expresión (6):

$$T = \frac{v_{\max} + v_{\min}}{v} \quad (6)$$

Tabla 4. Resumen datos del combustible (análisis de materias volátiles).

	Muestra 1 (g)	Muestra 2 (g)	Muestra 3 (g)
$m_1$	19,1269	19,2288	18,5316
$m_2$	20,1244	20,2315	19,5354
$m_3$	19,2955	19,3917	18,7670
$v_m$ (Contenido medio)	76,15%		
$T$ (Porcentaje del error)	0,015%		

### 2.1.1.5 Determinación del contenido en carbono fijo

El carbono fijo es la materia combustible que realmente contiene el combustible expresada en tanto por ciento en peso. Para obtenerlo basta con aplicar la expresión (7):

$$C.Fijo = [100 - (H_m + C_m + V_m)] \quad (7)$$

Por tanto la cantidad de carbono fijo del residuo combustible analizado es:

$$\%C.Fijo = [100 - (6,976 + 0,6861 + 76,15)] = 16,223\%$$

#### Tratamiento estadístico

El número de ensayos que se deben realizar con una muestra cualquiera en función de la "dispersión porcentual" viene determinado por la relación siguiente:

Para	T < 2 % .....	3 ensayos
Para	2 % ≤ T ≤ 8 % .....	6 ensayos
Para	T > 8 % .....	15 ensayos

La conclusión a la que se llega es que la biomasa analizada (en este ejemplo, ha sido hueso de aceituna limpio) contiene en mayor proporción materias volátiles del orden de 73,49%, teniendo en menores proporciones carbono fijo (16,38%), humedad (9,96%) y muy pocas cenizas (0,17%).

### 2.1.2 Determinación del poder calorífico

El poder calorífico es un parámetro muy importante en la caracterización de la biomasa. Este puede ser llamado poder calorífico superior (PCS) o poder calorífico inferior (PCI), siendo la unidad utilizada el kJ/kg. El poder calorífico superior representa el valor máximo de liberación de energía donde se considera la energía utilizada para la vaporización de agua presente en el combustible. Mientras el poder calorífico inferior representa el valor

máximo de energía útil, una vez que no considera la energía que es perdida para vaporizar el agua. Así el poder calorífico superior es el más utilizado para poder comparar la energía liberada por varios tipos de biomasa.

#### Determinación del poder calorífico superior de un combustible:

##### *Preparación del proceso utilizando un calorímetro modelo (Parr 1351):*

1. Se obtienen 2 litros de agua destilada y se controla su temperatura de forma que la diferencia térmica entre esta y el aceite de la camisa del equipo calorímetro esté entre 3 y 5 °C.
2. Se pesa la muestra del combustible, y que tenga un peso máximo de no más de 1 g.
3. Se prepara el filamento de Nicrom, encargado de proporcionar la temperatura necesaria para la combustión de la muestra en el calorímetro.
4. Se coloca en el calorímetro la muestra y el filamento de Nicrom.
5. Se cierra el calorímetro y se carga de oxígeno a una presión de 17 bares.
6. Se introduce el calorímetro en la cuba y está dentro del calorímetro.
7. Se conectan los electrodos al calorímetro y se introduce el agitador en la camisa de agua.

##### Comienzo del ensayo:

1. Se pone en marcha el equipo calorímetro.
2. Tras 4 minutos aparecen en pantalla y se imprimen los resultados preliminares.
3. Sacamos el calorímetro y procedemos a medir el hilo de Nicrom que no se ha quemado.
4. Comprobamos que se han quemado algunas calorías de este conductor, que ha de restarse a efectos de influencia de eliminar la influencia del hilo en los resultados finales.
5. Se introduce el dato en el equipo para obtener los resultados finales.

Los resultados obtenidos en el calorímetro (figura 24), es decir, el poder calorífico superior se muestran en el anexo I.



Figura 24. Calorímetro para determinar el PCS (Parr1351).

### 2.1.3. Determinación de la composición de las cenizas

Para la determinación de la composición de las cenizas de los distintos tipos de residuos estudiados, se han introducido las muestras de los residuos en un horno mufla durante un tiempo de 12 horas a una temperatura de 815°C para la obtención de cenizas. Posteriormente se han enfriado e introducido en un equipo analizador de cenizas marca Thermo scientific Niton XRF (ITISE Lda) como se indica en la figura 25. Este analizador determina la composición de las cenizas a tiempo real en un tiempo muy corto. Funciona con rayos-x fluorescente para detectar los diferentes elementos que componen las cenizas. Está diseñado para la utilización de la tecnología de análisis no destructiva. Finalmente, los resultados de la composición de cenizas obtenidos en los ensayos se guardaron en un documento en Excel.

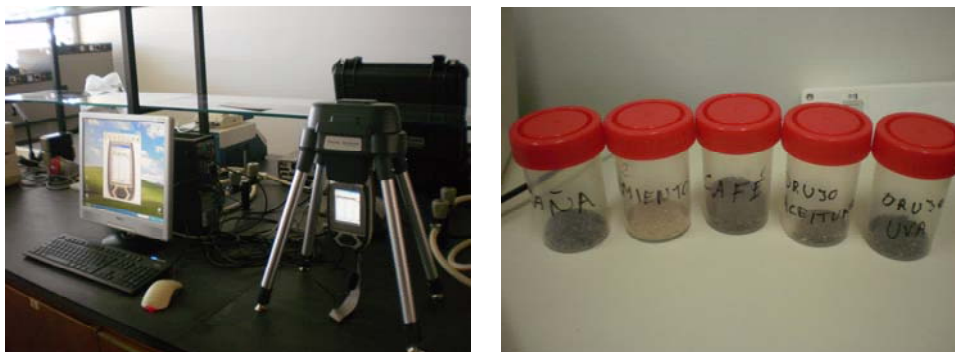


Figura 25. Analizador de composición de las cenizas (Thermo scientific Niton XRF).

#### 2.1.4 Análisis elemental

El análisis elemental de una muestra de residuo de biomasa tiene como propósito la determinación de los principales elementos químicos (orgánicos) constituyentes de la misma. Los elementos más abundantes y pertinentes para determinarse, en una primera fase, son el carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Es posible realizar esta determinación recorriendo un analizador elemental. El analizador elemental puede ser de dos reactores siendo posible determinar con uno de los reactores cuatro elementos químicos: carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre. El otro reactor permite determinar la cantidad de oxígeno de la muestra. Las lecturas son realizadas a través de un cromatógrafo que registra la variación del potencial, considerando un determinado tiempo de residencia para un determinado elemento.

A continuación se presenta un mapa indicativo de la comarca de Alentejo en Portugal (figura 26). La comarca de Alentejo se encuentra en Portugal entre todas las provincias tal como se observa en la misma figura 26.

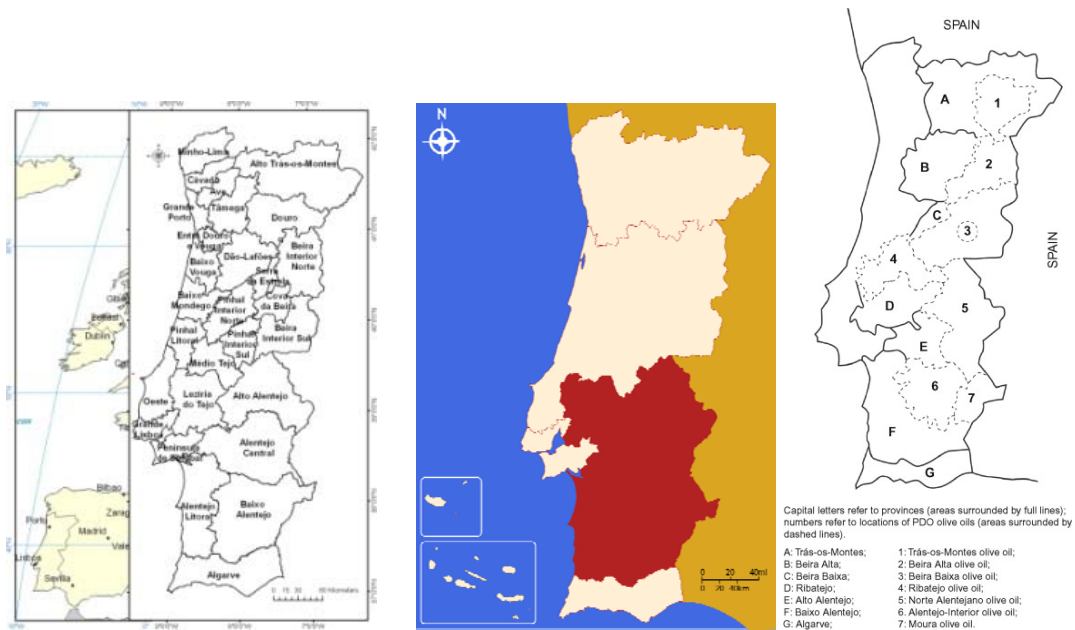


Figura 26. Mapa de Alentejo (Fuentes: Viana, et al., 2010 y Rosa, et al., 2010).

## 2.2 Instalación de ensayos de secado y combustión

La instalación de ensayos experimentales utilizada (figura 27) contiene una estufa de combustión instalada al secadero que utiliza como combustible el pellet de diferentes tipos de residuos de biomasa, cuya combustión se gestiona electrónicamente. El combustible biomásico se recoge del depósito de almacenaje de la estufa a través de un tornillo sinfín activado por un motor-reductor, se transporta al hogar de combustión. El encendido del combustible de biomasa se lleva a cabo por una resistencia eléctrica y el aire comburente es introducido en el hogar a través de un ventilador centrífugo.

Los humos producidos (gases de combustión) se extraen a través del mismo ventilador centrífugo, y se expulsan por la boca ubicada en la zona baja de la parte trasera de la estufa. La cantidad de combustible y la extracción de humos/alimentación de aire comburente, están reguladas a través de la ficha electrónica con el fin de obtener una combustión de alto rendimiento. En la parte frontal están instalados un panel sinóptico y los dos conmutadores que permiten la gestión y la visualización de todas las fases de funcionamiento. Estas mismas fases pueden gestionarse a partir del mando a distancia. La tolva está ubicada en la parte alta de la estufa, y el rellenado del depósito se realiza a través

de la tapa situada en la parte posterior de la tolva. La figura 28 muestra la instalación de ensayos experimentales con aislamiento térmico para evitar las pérdidas caloríficas al exterior.

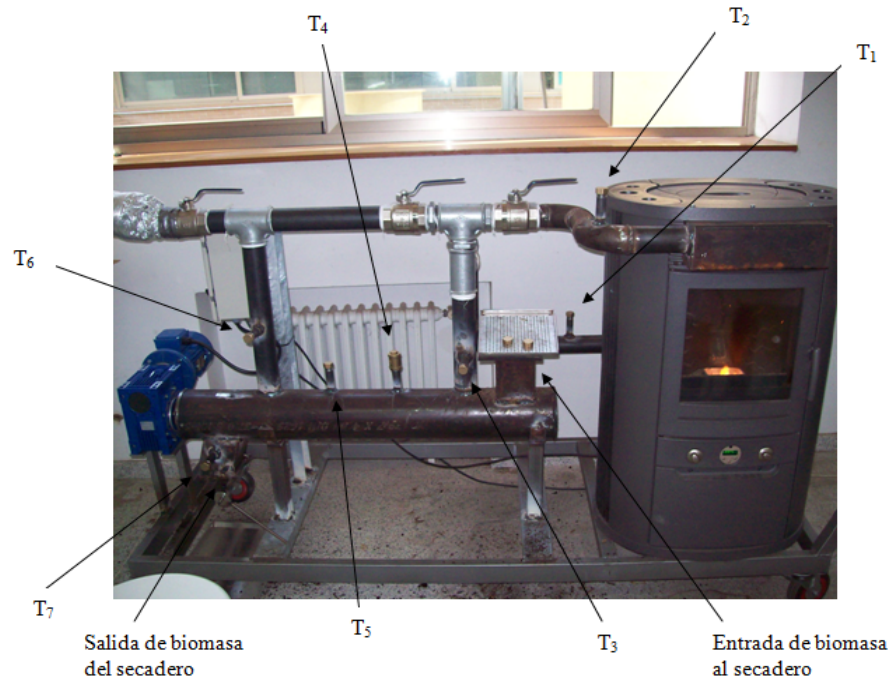


Figura 27. Instalación de ensayos de secado térmico (secadero sin aislamiento).

Siendo las temperaturas de la figura 28 son:

$T_1$  = Temperatura de salida de los humos

$T_2$  = Temperatura de salida del aire

$T_3$  = Temperatura de entrada al secadero

$T_4$  = Temperatura de segunda toma del secadero

$T_5$  = Temperatura de tercera toma del secadero

$T_6$  = Temperatura de salida del secadero

$T_7$  = Temperatura de toma de muestra de la biomasa



Figura 28. Instalación de ensayos de secado térmico (secadero con aislamiento).

### 2.2.1 Estufa de combustión de pellet

La estufa modelo Iris (EDILKAMIN) se muestra en la figura 29. Esta estufa utiliza como combustible el pellet de biomasa, cuya combustión se gestiona electrónicamente. El combustible (pellet) se recoge del depósito de almacenaje (A) y a través de una cóclea (B) activada por un motoreductor (C) se transporta en el crisol de combustión (D).

El encendido del pellet se lleva a cabo a través de aire caliente producida por una resistencia eléctrica (E) y aspirada en el crisol a través de un ventilador centrífugo (M). Los humos producidos por la combustión se extraen del hogar a través del mismo ventilador centrífugo (M) y se expulsan por la boca (F) ubicada en la zona baja de la parte trasera de la estufa.

A través del ventilador (G) se hace transitar el aire en el intersticio de la parte posterior del hogar, donde se calienta para luego salir al exterior desde la parrilla frontal (I). La cantidad de combustible y la extracción de humos/alimentación aire comburente, están reguladas a través de ficha electrónica (N) con el fin de obtener una combustión de alto rendimiento.

En la parte frontal debajo del postigo están instalados un panel sinóptico (L) y las dos manoplas que permiten la gestión y la visualización de todas las fases de funcionamiento. Estas mismas fases pueden gestionarse a través del mando a distancia (opcional). El

depósito del combustible está ubicado en la parte alta de la estufa. El rellenado del depósito se realiza a través de una tapa, situada en la parte posterior del tope.

La estufa está realizada con una estructura interior compuesta completamente por hierro fundido. El revestimiento exterior está disponible en diferentes materiales, que en nuestro caso cerámica de color gris.



Figura 29. Esquema de la estufa de combustión de pellet (EDILKAMIN).

### 2.2.2 Analizador de gases de combustión

Se ha utilizado varios instrumentos de medición de temperatura y porcentajes de gases de combustión en el proceso de secado del orujo de aceituna. Uno de los instrumentos es el Testo 335, un analizador de gases de combustión (figura 30). Con este aparato se ha medido la temperatura de los gases a la salida de la estufa y en el interior del secadero en diferentes puntos. El Testo 335 es el analizador de gases de combustión de nueva generación, diseñado especialmente para los requisitos de las aplicaciones industriales. El testo 335 destaca por su gran versatilidad; puede ser usado tanto por operarios de sistemas de combustión industriales como procesos o plantas de energía, por servicios técnicos de calderas y hornos, para la construcción de plantas y también para motores fijos. Incluso

ofrece la posibilidad de efectuar mediciones puntuales continuas hasta un máximo de dos horas.



Figura 30. Analizador de gases de combustión Testo 335.

### 2.2.3 Otros instrumentos

Se han utilizado otros instrumentos de medición de temperatura en diferentes puntos de la instalación de secado y combustión, talos como termopares, balanza electrónica para determinar el peso de las muestras de biomasa y medidores de humedad portátiles.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado serán presentados los resultados obtenidos en el presente estudio y seguidamente serán discutidos.

#### 3.1 Cálculo del secadero estudiado

El objetivo principal de este cálculo térmico es para la predicción del funcionamiento del secadero, y determinación de la cantidad de calor necesaria ( $Q_{\text{gas}}$ ) para el proceso de secado. También, sirve para estimar la longitud de secado con el fin de darnos una idea sobre las dimensiones del secadero que utilizamos en los ensayos. Para ello, se realiza el balance energético en el secadero. En este balance se consideran los parámetros de entrada (biomasa húmeda + gas caliente) y los parámetros de salida (biomasa seca + gas menos caliente + pérdidas caloríficas). Este balance representa un proceso complejo de transferencia de calor y masa simultáneamente entre el gas desecante y los residuos de biomasa húmeda que se encuentran en el interior del secadero. A continuación se presenta el procedimiento de cálculo y los resultados obtenidos.

La expresión (8) que indica el balance energético en el secadero es la siguiente:

$$\dot{m}_{\text{gas1}} \cdot h_{\text{gas1}} + \dot{m}_{\text{bioseca}} \cdot h_{\text{bio1}} + \dot{m}_{\text{agua}} \cdot h_{\text{agua}} = \dot{m}_{\text{gas2}} \cdot h_{\text{gas2}} + \dot{m}_{\text{bioseca}} \cdot h_{\text{bio2}} + Q_{\text{pérd}} \quad (8)$$

De la expresión (8) se puede obtener la cantidad de calor necesaria del gas desecante para el proceso de secado como se indica en la expresión (9):

$$\dot{m}_{\text{gas}} \cdot c_{p_{\text{gas}}} \cdot (T_{\text{gas1}} - T_{\text{gas2}}) = \dot{m}_{\text{bioseca}} \cdot c_{p_{\text{bioseca}}} \cdot (T_{\text{bio2}} - T_{\text{bio1}}) - \dot{m}_{\text{agua}} \cdot h_{\text{agua}} + Q_{\text{pérd}} \quad (9)$$

Donde el primer término de la expresión (9) representa el calor cedido por el gas de combustión en el secadero. A continuación, la expresión (10) representa esta misma cantidad de calor que tiene el gas caliente procedente de la combustión del orujo:

$$\dot{m}_{\text{gas}} \cdot c_{p_{\text{gas}}} \cdot (T_{\text{gas1}} - T_{\text{gas2}}) = Q_{\text{gas}} \quad (10)$$

Por otra parte, para obtener el rendimiento térmico del secadero, se utiliza la siguiente ecuación (para flujos en paralelo, ya que la relación del producto de los calores específicos de residuos de biomasa y los caudales es el mínimo):

$$\eta = \frac{T_{\text{bio}2} - T_{\text{bio}1}}{T_{\text{gas}1} - T_{\text{bio}1}} \cdot 100 \quad (11)$$

Los resultados obtenidos que representan el rendimiento térmico del secadero, para el caso del orujo de aceituna tienen un valor medio de 60%. Este valor medio es obtenido de los resultados de las temperaturas indicadas en las Tablas 7 y 8 ( $T_7=T_{\text{bio}2}$ ,  $T_3=T_{\text{gas}1}$  y  $T_{\text{bio}1} \approx 20^\circ\text{C}$ ). Como se puede ver, el rendimiento de secado es relativamente bajo, debido a la baja temperatura de los gases de combustión, y por otra parte depende del tiempo de secado.

Para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor, se utiliza el valor del calor cedido por el gas de combustión ( $Q_{\text{gas}}$ ) obtenido de la ecuación (10) en función del caudal del gas y sus temperaturas, aplicando la siguiente expresión (Chapman, 1990):

$$Q_{\text{gas}} = U_b \cdot A_b \cdot \Delta T_{m_{lg}} \quad (12)$$

donde:

$U_b$  = coeficiente global de transmisión de calor,  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

$A_b$  = área de intercambio entre la biomasa y el gas caliente,  $\text{m}^2$ .

$\Delta T_{m_{lg}}$  = incremento de temperatura media logarítmica,  $^\circ\text{C}$ .

Para resolver la expresión (12), tenemos que determinar todas las variables, como se indica a continuación. Al principio del proceso de secado, la biomasa ocupa una posición en el interior del tambor del secadero como se muestra en la figura 31.

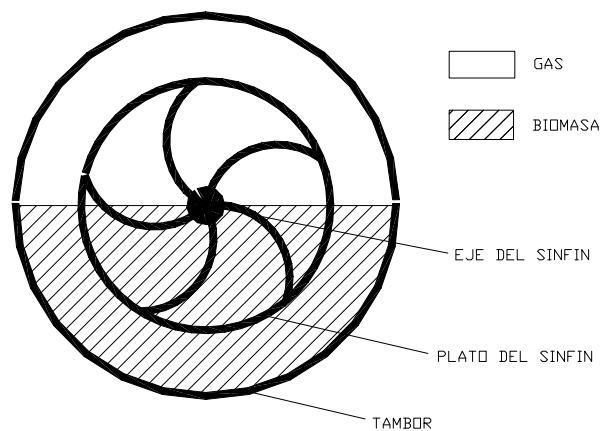


Figura 31. Posición de partida de la biomasa.

No obstante, debido a la acción del tornillo sinfín, la biomasa llegará a elevarse hasta un ángulo de  $22^\circ$  sobre su horizontal, presentando la disposición que puede observarse en la figura 32.

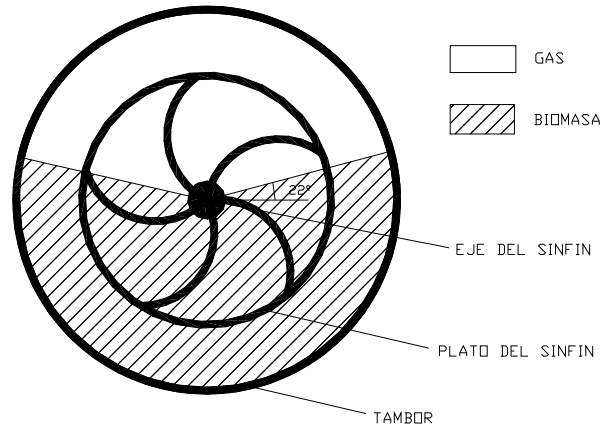


Figura 32. Elevación de la biomasa por efecto del sinfín.

El planteamiento realizado para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor ( $U_b$ ) es el de considerar un sistema formado por un conjunto de anillos concéntricos equivalentes a la proporción que por densidad y volumen van a ocupar dentro del tambor (figura 33).

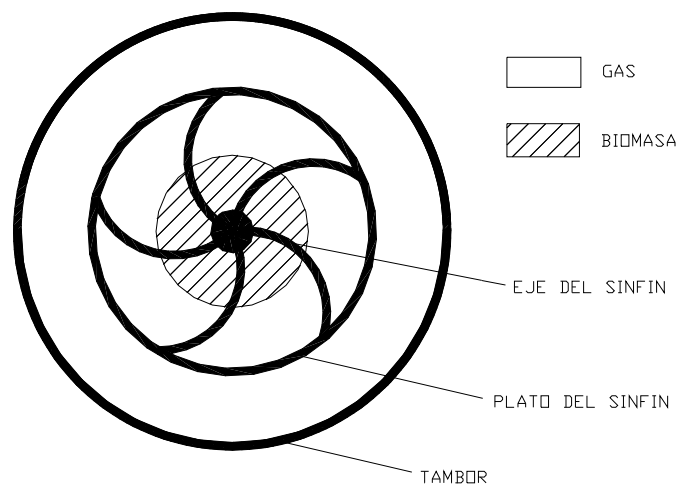


Figura 33. Disposición de estudio termodinámico.

Entonces, en el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor ( $U_b$ ) se ha considerado un cilindro de capas múltiples donde la transmisión de calor se produce por: convección del gas, conducción de la biomasa y conducción del sin fin.

Para facilitar los cálculos y poder despejar la temperatura del gas de salida, se va a determinar  $\Delta Tm_{lg}$  de la expresión (13) como sigue:

$$\Delta Tm_{lg} = \frac{T_{gas1} + T_{gas2}}{2} - \frac{T_{bio1} + T_{bio2}}{2} \quad (13)$$

siendo:

$T_{bio1}$  = temperatura de entrada de la biomasa, °C.

$T_{bio2}$  = temperatura de salida de la biomasa, °C.

$T_{gas1}$  = temperatura de entrada del gas, °C.

$T_{gas2}$  = temperatura de salida del gas, °C.

### 3.2 Estimación de la longitud necesaria del secadero

Teniendo en cuenta los parámetros de la expresión (12), se concentra en la determinación del área de intercambio de calor entre la biomasa y el gas  $A_b$ . Este área se puede expresar en función del grado de llenado de biomasa y la longitud del secadero, como se muestra en la siguiente expresión:

$$A_b = L \cdot (L_{circ} \cdot \tau_{bio}) \quad (14)$$

donde:

$A_b$  = área de intercambio entre la biomasa y el gas, m<sup>2</sup>;

siendo:

$L$  = longitud del secadero, m

$L_{circ}$  = longitud de la circunferencia de contacto entre el gas y la biomasa ( $\pi D_b$ ), m.

$\tau_{bio}$  = grado de llenado de la biomasa en el interior del tambor (superficie transversal llena de biomasa referente a la sección transversal del tambor), %.

Finalmente, sustituyendo los términos de las expresiones (13) y (14) en la expresión (12), se obtiene la longitud necesaria para el secadero de la expresión (15):

$$L = \frac{Q_{gas}}{U_b \cdot L_{circ} \cdot \tau_{bio} \cdot \left[ \frac{(T_{gas1} + T_{gas2})}{2} - \frac{(T_{bio1} + T_{bio2})}{2} \right]} \quad (15)$$

Los resultados obtenidos del valor medio del coeficiente global de transmisión de calor basado en la superficie interior del secadero ( $U_b$ ) han sido utilizados para el cálculo de la longitud del secadero. Teniendo en cuenta que para determinar el valor de  $U_b$  se aplican las fórmulas de transmisión de calor, en las que se considera el tipo de biomasa, su conductividad térmica y su cantidad en el interior del secadero.

Finalmente, se ha considerado un diámetro interior de 20 cm del tambor del secadero, y se han realizado los cálculos mencionados para la determinación de la longitud necesaria del secadero. El resultado fue una longitud de 1m para el diámetro interior considerado. Este valor es totalmente aceptable y se ajusta a las dimensiones de la instalación experimental utilizada en los ensayos. También, se puede deducir que la relación entre la longitud del secadero y la temperatura de los gases de combustión es inversa. Se ha observado que el tipo del residuo de biomasa (su textura higroscópica) y su tamaño caracterizan el proceso de secado. En el caso del orujo de aceituna necesita más tiempo (menor velocidad de giro del tornillo sinfín) de estar en el secadero, debido a su menor textura higroscópica. Sin embargo, en cuanto a los periodos de secado, son importantes desde el punto de vista económico y energético, es decir, el tiempo de residencia de los residuos de biomasa en el secadero es directamente proporcional al proceso de evaporación del agua retenida en los residuos y al coste energético.

En los ensayos de combustión y secado realizados se ha observado que los orujos secos de aceituna se queman rápidamente y en un tiempo menor, debido a que su poder calorífico superior (PCS) es mayor. Esto implica una reducción en el periodo del proceso de combustión y, por tanto produce un ahorro energético y económico en la cantidad de combustible utilizado.

### 3.3 Resultados de la caracterización de los residuos

Los resultados de los análisis inmediato y elemental de los residuos caracterizados en el presente estudio se presentan en las Tablas 1 y 2 respectivamente. Del análisis inmediato,

se desprende que estos residuos presentan un bajo contenido en carbono fijo y una elevada cantidad de materia volátil; el contenido en volátiles es favorable hasta valores en torno al 20%, pero a partir de esta magnitud se desprenden compuestos de nitrógeno y oxígeno no combustibles que no contribuyen a incrementar el poder de combustión del residuo. De las Tablas indicadas se deduce que las materias volátiles varían entre el 32,62% y el 82,00%, y el carbono fijo representa el 11,62% y el 18,20% de entre todas las muestras estudiadas.

En cuanto a las cenizas, se destaca su bajo porcentaje, con las ventajas que ello conlleva. Lo que indica que esos residuos podrán ser utilizados como combustibles en procesos de combustión directa y ampliamente en gasificación al tener un porcentaje alto de volátiles.

El análisis elemental, señala el bajo contenido generalizado de azufre que presentan estos residuos y que lo hace especialmente apropiado desde un punto de vista medioambiental.

Tabla 5. Caracterización de los residuos estudiados de Alentejo.

Residuo	PCS <sub>bs</sub> (kcal/kg)	PCS <sub>bs</sub> (kJ/kg)	PCS <sub>bh</sub> (kcal/kg)	Análisis inmediato (%)				Análisis elemental (%)			
				Humedad	Carbono fijo	Volátiles	Cenizas	C	H	N	S
Orujo de uva	5140,20	21520,98	2747,66	53,15	12,08	32,62	2,16	25,64	8,63	1,90	0,05
Orujo de aceituna	5412,44	22660,80	3594,56	62,70	11,62	24,85	0,83	29,57	8,51	2,36	0,04
Cáscara de café	4759,99	19929,12	3970,54	21,94	12,46	57,24	8,36	35,82	6,61	9,44	0,15
Poda Sarmient	4673,21	19565,79	3628,03	15,38	15,04	66,89	2,68	82,85	6,91	3,16	0,05
Mis-canthus	4608,52	19294,95	4063,76	10,99	16,25	70,09	2,67	41,75	6,13	0,24	0,07
Corcho (polvo)	6623,19	27730,00	—	8,33	18,20	80,35	1,45	57,95	7,020	0,42	0,04
Eucalipto	4251,45	17800,00	3322,64	8,44	17,94	82,00	0,06	47,29	6,050	0,11	0,00

A continuación, en la Tabla 6 se presentan los resultados del análisis de composición de las cenizas de los diferentes residuos estudiados de Alentejo.

Se observa que las cenizas contienen numerosos elementos químicos de utilidad. Esta caracterización puede ser significativa en el caso del empleo de estos residuos de la combustión (cenizas) como abono sobre terrenos cultivados.

También existe un objetivo global de valorización de materiales alternativos de origen agrícola o forestal para atender a nuevos retos constructivos de sostenibilidad, resistencia y durabilidad, así como la necesidad de minimizar el Impacto Medioambiental, buscando:

- Proporcionar una nueva aplicación comercial a los diferentes residuos de la industria agrícola y de generación de energía de biomasa, introduciendo un valor añadido al residuo y aportando nuevas soluciones medioambientales.
- Desarrollar materiales de construcción que respondan a prestaciones similares a los convencionales, partiendo de conglomerantes de bajo coste energético y económico.
- Posibilidad de trabajar con materia prima del entorno sin necesidad de gran innovación industrial o tecnológica.
- Adecuación de los residuos a los requisitos establecidos por las empresas para el desarrollo de nuevos materiales de construcción y establecimiento de las potenciales aplicaciones en las infraestructuras de transporte lineal.

Por otro lado se modificarían las propiedades durables de los materiales de construcción de la forma siguiente:

- Estabilidad química.
- Cenizas de Fondo (CF): áridos potencialmente no reactivos para álcali-silicato y álcali-carbonato.
- Cenizas Volantes (CV): áridos potencialmente no reactivos álcali-silicato y con ligera reactividad álcali-carbonato.
- La inclusión de CV y CF de quema de orujo seco (orujillo) no penaliza las resistencias mecánicas finales, sino da una durabilidad en ambientes agresivos específicos: Ambientes con fenómenos hielo-deshielo.

Evolución de propiedades microestructurales del cemento:

- Con las cenizas de los residuos se consigue una menor presencia de anhídros del cemento y un aumento de fases carbonatadas.

En conclusión, el empleo de los residuos procedentes de la combustión de biomasa en mezclas suelo-cemento que se utilicen en la construcción de bases y sub-bases de infraestructuras de transporte lineal es viable, si bien esta viabilidad depende de la procedencia y el tipo de residuo empleado. La utilización de las CV y CF de la combustión de biomasa agrícola y/o forestal en la construcción de infraestructuras de transporte lineal lleva asociadas significativas ventajas medioambientales y económicas

Tabla 6. Análisis y composición de las cenizas de los residuos de Alentejo.

Análisis de cenizas	Residuo (ppm)						
	Orujo de uva	Orujo de aceituna	Cáscara de café	Poda (Sarmiento)	Miscanthus	Corteza	Eucalipto
Mo	9,17	14,27	12,31	9,39	7,09		
Na <sub>2</sub> O						1,38	
Mg				98259,56			182,00
Na							243,00
Zr	44,27	44,77	52,23	28,23	50,12		
MgO						10,39	
Sr	598,05	631,53	1137,49	1163,40	134,92		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						9,86	
Rb	151,16	122,22	99,67		62,37		
SiO <sub>2</sub>						16,69	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>						8,80	
Pb		31,76		17,68	30,27		
ClO						1,53	
CaO						22,53	
SO <sub>3</sub>						3,97	
As		10,62					
Zn	250,63	699,51	55,36	255,62	436,68		
K <sub>2</sub> O						4,44	
Cu	1167,2	1394,12	2257,88	452,82	251,66		1,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						3,17	
Ni	1451,25	189,90	171,82	436,38	143,67		0,12
MnO						1,06	
Fe	12536,09	27576,00	21424,53	27374,22	6658,92		3,52
Mn	2265,46	2001,79	1402,00	1373,87	2659,18		16,60
Sn			36,04	66,93			
Ag		13,78					
Bal	555277,80	430146,70	495614,30	424924,60	528713,90		
Nb	7,74	12,24	11,42	14,13	7,27		
Cr	135,77	104,06	84,81	303,78			
V	157,75	122,92	270,99	233,27			
Ti	678,27	745,78	1670,09	1315,72			
Ba	285,40		949,74	200,90			
Ca	149538,70	227520,50	217630,00	276626,30			541,00
K	187730,70	178688,20	117117,10	31933,51			823,00
Al			9271,05	18809,26			53,00
P	23570,13	61566,04	17634,55	35144,81			
Si	32596,46	36363,33	25720,15	55637,63			13,00
Cl				391,74			
S	16196,58	23783,73	34171,33	24899,47			

### 3.4 Combustión y secado del orujo de aceituna

En la Tabla 7 se presenta una muestra de los resultados obtenidos en la combustión y secado del orujo de aceituna. La cantidad media de orujo quemado fue del orden de 0,00015 kg/s. Se observa un aumento de la concentración de CO a la entrada del secadero (punto 3), que esto podría ser debido a la materia volátil desprendida del orujo de aceituna una vez que entra en contacto con el gas caliente dentro del secadero. A partir del punto 4 la concentración tiende a disminuir debido a la falta de materia volátil y a la disminución de la temperatura del gas en el interior del secadero por la cesión del calor y las pérdidas caloríficas. Por otra parte los resultados de la combustión que aparecen en la Tabla 7 se presentan en la figura 34. En esta figura, el punto 1 representa las condiciones a la salida de la estufa de combustión del orujo de aceituna y el punto 3 representa las condiciones de entrada al secadero. En esta figura  $\lambda$  representa el exceso de aire, %ren representa el rendimiento de combustión y %qA representa las pérdidas por gases. Estos parámetros son obtenidos mediante el analizador de gases Testo 335.

Tabla 7. Ensayos de combustión y secado del orujo de aceituna.

Puntos de medición	1	3	4	5	6	7
Temp.	T1	T3	T4	T5	T6	T7
T-gas	184	142	110,8	100	88	89
TA	17,2	17,5	18,3	19	20,4	20
% O <sub>2</sub>	15,2	18,57	16,86	16,31	15,84	16
ppm CO	116	454	430	242	230	230
% CO <sub>2</sub>	5,71	3,27,1	3,04	4,08	6,27	5,07
$\lambda$	3,56	8,45	4,99	4,8	3,26	4,01
% ren	79,6	64,4	79,7	85	87,2	88
% qA	21	14,2	16	7,6	5,8	5,8
ppm NO	104	91	86	87	86	86

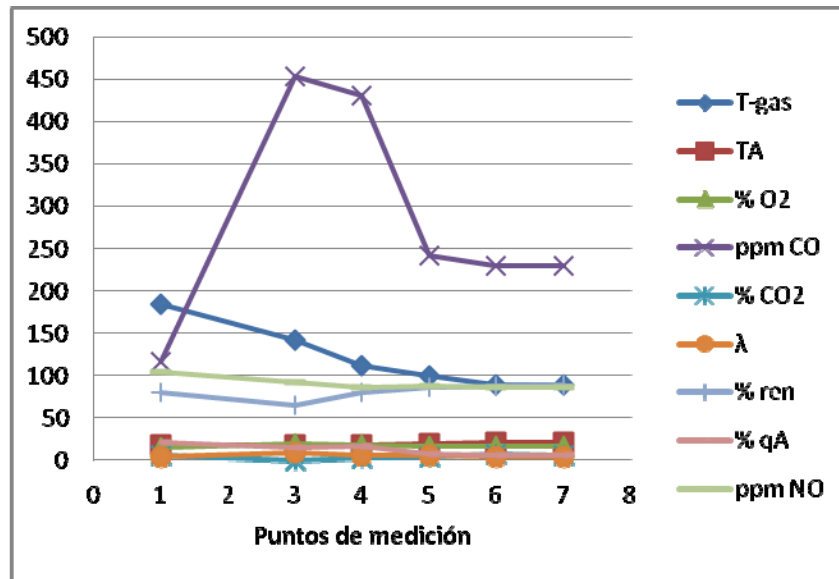


Figura 34. Productos de combustión del orujo de aceituna, medidos en diferentes puntos de la instalación experimental.

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos en el proceso de secado del orujo de aceituna. Se ha presentado la evolución de la temperatura en el interior del secadero con respecto al tiempo. Se observa que los ensayos se han realizado en cuatro pasadas para obtener una muestra de orujo más seca y con menos contenido de humedad.

En la figura 35 se presenta la temperatura del interior del secadero medida en diferentes puntos a lo largo del mismo. Se observa un descenso considerable de la temperatura a la entrada del secadero, debido al intercambio de calor entre el gas de combustión y el orujo y a las pérdidas caloríficas al exterior. En el resto del recorrido del gas, el descenso de la temperatura es menor, ya que el gas caliente absorbe la humedad a temperatura constante. Es decir, que el orujo absorbe el calor latente de evaporación del gas caliente.

También se puede observar que la temperatura del gas caliente de secado es más elevada cuando aumenta del número de pasadas. Esto es debido al correcto funcionamiento de la estufa de combustión, que con mayor tiempo de funcionamiento aumenta la temperatura de salida de los gases de combustión hasta llegar a un límite, que a partir del cual se mantiene casi constante la temperatura de los gases, en función del tipo de la biomasa quemada (depende su poder calorífico superior). En el caso de la combustión del orujo de aceituna estudiado, llegando a la cuarta pasada la temperatura de los gases rodea 197 °C y no sube

más. Para ello, si aumentamos la longitud del secadero hasta 2 metros se pueden reducir las pasadas realizadas en el proceso de secado. Finalmente, se puede deducir que cada tipo de residuo de biomasa tiene que ser estudiado a fondo para saber el tipo de secadero adecuado para ello.

Tabla 8. Ensayos del proceso de secado del orujo de aceituna.

Velocidad giro=5rpm, Puntos de medición	1	3	4	5	6	7
Tgas	T1	T3	T4	T5	T6	T7
Sin biomasa		144,8	110,8	100	88	89
Orujo de aceituna 1ª Pasada	184	142	138	132	113	115
Orujo de aceituna 2ª pasada	189,8	152	142,5	115	112	113
Orujo de aceituna 3ª pasada	191	159	144,2	117	114	113
Orujo de aceituna 4ª pasada	196,2	166	150,3	123	118	114

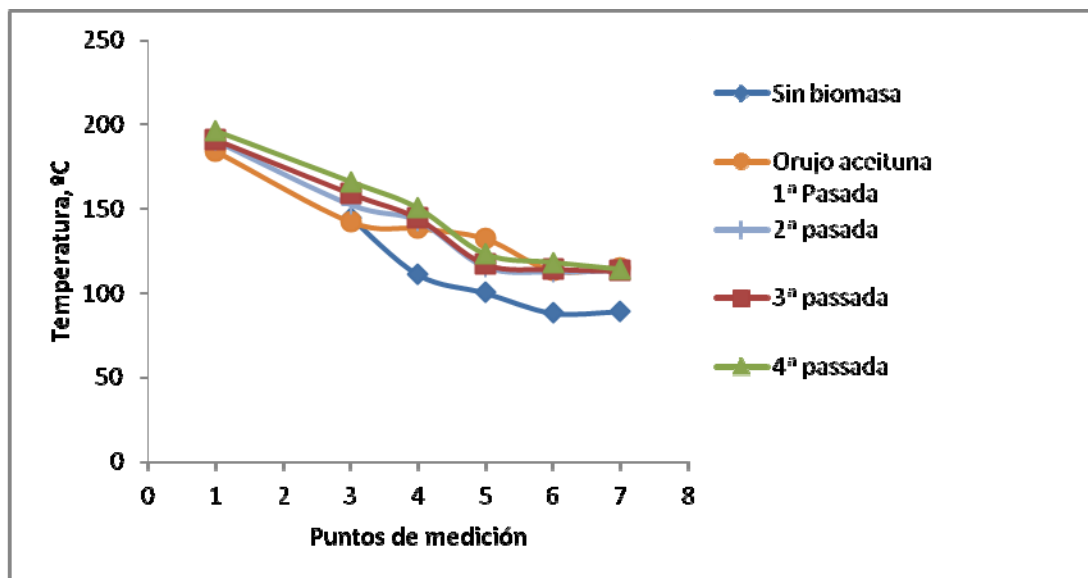


Figura 35. Evolución de la temperatura en el interior del secadero, durante el proceso de secado del orujo de aceituna.

En la Tabla 9 se presenta la variación de la humedad del orujo de aceituna durante el proceso de secado. También, se ha presentado en la figura 36, el contenido de la humedad del orujo de aceituna durante las cuatro pasadas realizadas en los ensayos. Se observa una reducción del contenido de humedad del 81% en un tiempo de 1 hora aproximadamente, quemando 0,54 kg de orujo de aceituna seco como combustible, en la cámara de combustión de la estufa. A la vista de los resultados obtenidos, se deduce que podemos realizar el proceso de secado de los residuos en un tiempo menor para poder ahorrar energía en trabajos futuros, si hacemos variar los siguientes parámetros:

- Aumentar el caudal de los gases calientes en el secadero.
- Disminuir el caudal de los residuos entrantes en el secadero.
- Incrementar la temperatura de los gases entrantes.
- Reducir la velocidad de giro del tornillo sinfín del secadero.
- Reducir el tamaño de los residuos que queremos secar.

Finalmente, se deduce que la operación de secado puede ser considerada como una operación energética elemental y especialmente como una de las operaciones térmicas básicas de la industria. Los principales objetivos pretendidos con las operaciones de secado son: facilitar un proceso industrial a través de la utilización satisfactoria de un producto, mejora del rendimiento de la instalación y reducir los costes (en almacenamiento, transporte y conservación del producto). Este último depende del tipo de secadero y de las propiedades del residuo. Un secadero de tipo cilíndrico rotativo se puede utilizar en la industria para secar residuos de tamaño considerable e irregular. Sin embargo un secadero de tipo estufa de secado se utiliza para residuos y productos de pequeñas dimensiones y diferentes propiedades.

Tabla 9. Humedad del orujo de aceituna con respecto al tiempo de secado.

<b>Velocidad de giro=5 rpm</b>		
<b>Orujo de aceituna húmedo</b>	% Humedad	Tiempo, s
Producto húmedo	62,7	0
1ª Pasada	46,68	840
2ª Pasada	36,76	1680
3ª Pasada	22,94	2520
4ª Pasada	11,82	3360

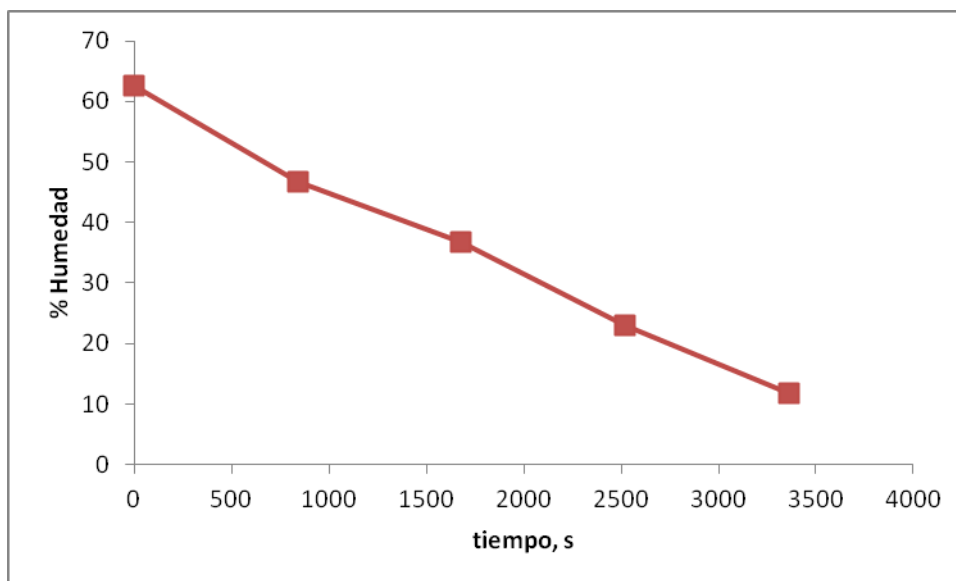


Figura 36. Variación de humedad del orujo de aceituna frente al tiempo de secado.

La Tabla 10 muestra los pesos medidos en (g) de las muestras del orujo de aceituna, a la entrada y salida del secadero para cada pasada. Se observa que la pérdida de peso es mayor en la primera pasada mientras en la última pasada es menor. Esto es debido a que la humedad superficial del orujo se pierde rápidamente en las primeras pasadas y posteriormente se pierde la humedad del interior de la masa del orujo lentamente, debido a la dificultad de evaporación del agua retenida en el interior de la estructura molecular del orujo.

Tabla 10. Pesos de las muestras para el cálculo de la humedad.

Peso	$P_e$ (g)	$P_s$ (g)
Pasada		
1 <sup>a</sup>	100,2	86,58
2 <sup>a</sup>	86,58	75,35
3 <sup>a</sup>	75,35	51,45
4 <sup>a</sup>	51,45	42,68

En las Tablas 11 y 12 se presentan los resultados de los ensayos de secado del orujo para dos pasadas, con una velocidad de rotación del tornillo sinfin más baja (3 rpm). Se observa que al reducir la velocidad de rotación del tornillo a 3 rpm (es decir aumentar el tiempo de secado) disminuye la temperatura del gas a la salida del secadero, debido a la cesión del calor al residuo y a las pérdidas caloríficas al exterior. La evolución del resto de los parámetros (Temp. ambiente, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y NO) sigue la misma tendencia para ambas velocidades de rotación 3 y 5 rpm. En las figuras 37 - 42 se presentan los resultados recogidos en las dos Tablas mencionadas 11 y 12.

Tabla 11. Ensayos de secado del orujo de aceituna, velocidad de giro 3 rpm, 1ª pasada.

<b>Orujo de aceituna Velocidad de giro = 3 rpm 1ª Pasada</b>						
<b>Puntos de medición</b>	<b>Punto 1</b>	<b>Punto 2</b>	<b>Punto 3</b>	<b>Punto 4</b>	<b>Punto 5</b>	<b>Punto 6</b>
<b>Temp. gas</b>	<b>T1</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>
<b>Temperatura gas combustión °C</b>	184	142	110,8	100	88	89
<b>Temperatura ambiente °C</b>	18,2	18,5	18,8	19	20,4	20
<b>Oxígeno %</b>	15,2	18,57	16,86	16,31	15,84	16
<b>Monóxido carbono PPM</b>	116	423	430	242	230	230
<b>Dióxido de carbono %</b>	5,71	4,7	4,04	4,08	5,9	5,07
<b>Monóxido de Nitrógeno PPM</b>	104	91	86	87	86	86

Tabla 12. Ensayos de secado del orujo de aceituna, velocidad de giro 3 rpm, 2ª pasada.

<b>Orujo de aceituna Velocidad de giro = 3 rpm 2ª Pasada</b>						
<b>Puntos de medición</b>	<b>Punto 1</b>	<b>Punto 2</b>	<b>Punto 3</b>	<b>Punto 4</b>	<b>Punto 5</b>	<b>Punto 6</b>
<b>Temp. gas</b>	<b>T1</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>
<b>Temperatura gas combustión °C</b>	170,4	150,4	120,7	110,4	93,5	79
<b>Temperatura ambiente °C</b>	19,9	20,6	21,6	21,3	21,5	22,4
<b>Oxígeno %</b>	16,22	16,34	15,77	16,93	16,32	17,62
<b>Monóxido carbono PPM</b>	86	93	130	143	143	131
<b>Dióxido de carbono %</b>	4,71	5,5	5,15	4	4	3,32
<b>Monóxido de Nitrógeno PPM</b>	88	101	100	88	88	71

En la figura 37 se ha presentado la evolución de la temperatura del gas producto de combustión del orujo de aceituna, en su recorrido dentro del secadero, para dos pasadas. Se observa una disminución de la temperatura debido a la transferencia de calor con la biomasa (orujo de aceituna)

y a las pérdidas caloríficas al exterior. En la figura 38 se ha presentado la temperatura ambiente del laboratorio durante el periodo de los ensayos para cada punto del secadero.

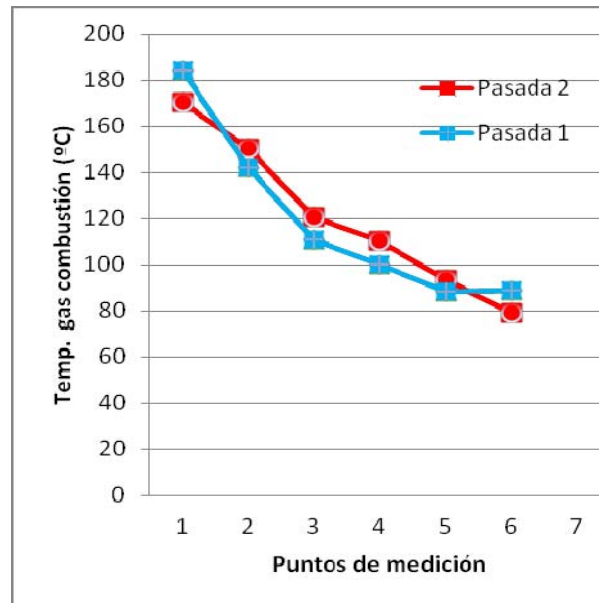


Figura 37. Evolución de la temperatura del gas de combustión.

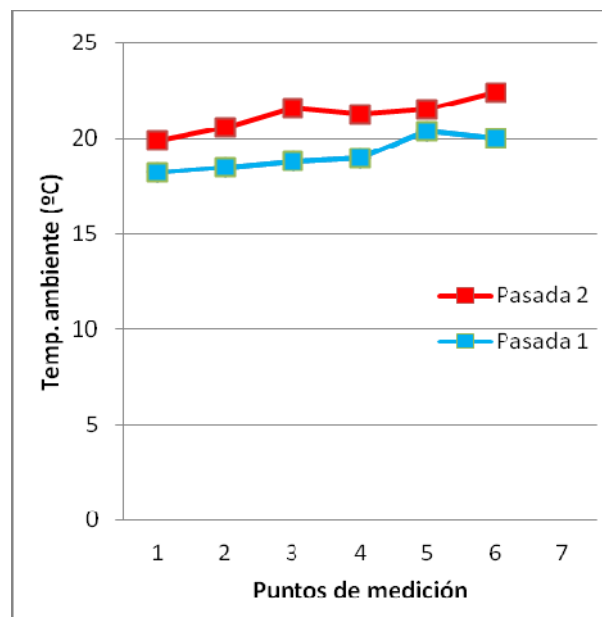


Figura 38. Variación de la temperatura ambiente durante los ensayos.

En la figura 39 se ha presentado el porcentaje de oxígeno en el gas producto de combustión durante el proceso de secado. Se observa una menor fluctuación del porcentaje entre el 16 y el 22% aproximadamente.

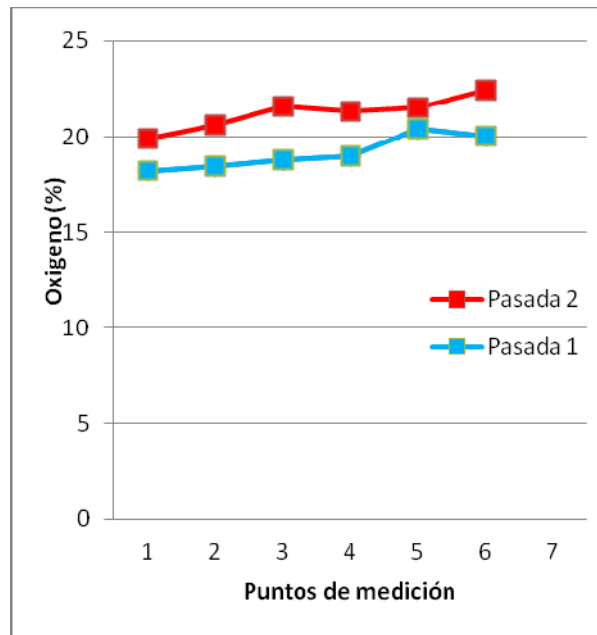


Figura 39. Porcentaje de oxígeno del gas producto de combustión durante el proceso de secado.

En la figura 40 se ha presentado la cantidad de CO en el gas de combustión durante su recorrido en el secadero. Se puede observar un aumento considerable a la entrada del secadero y posteriormente una disminución que se mantiene hasta la salida del gas del secadero. Esto podría ser debido a la materia volátil gaseosa desprendida del orujo de aceituna una vez que entra en contacto con el gas caliente dentro del secadero.

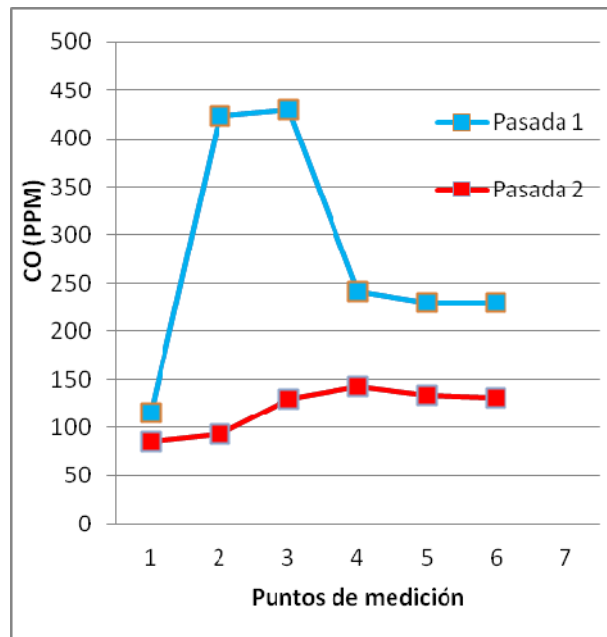


Figura 40. Concentración del monóxido de carbono del gas producto de combustión durante el proceso de secado.

En las figuras 41 y 42 se han presentado el porcentaje de CO<sub>2</sub> y la cantidad de NO. Se observa una menor fluctuación en el recorrido del gas dentro del secadero, con una reducción hasta su punto de salida del mismo.

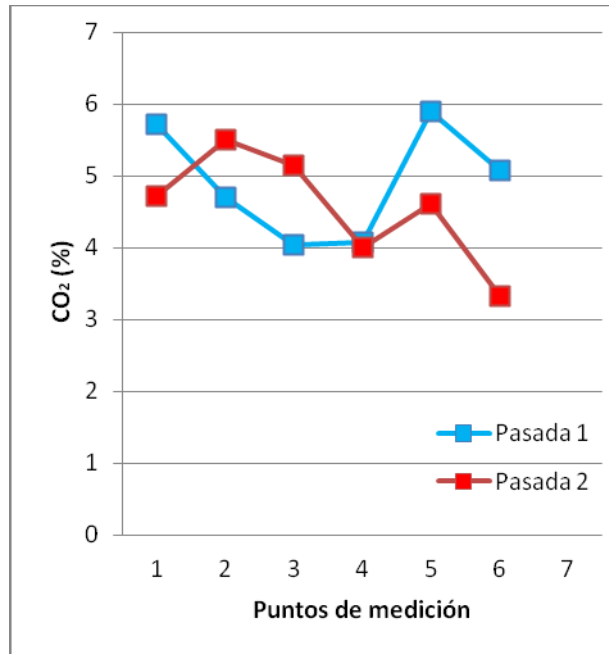


Figura 41. Porcentaje del dióxido de carbono del gas producto de combustión durante el proceso de secado.

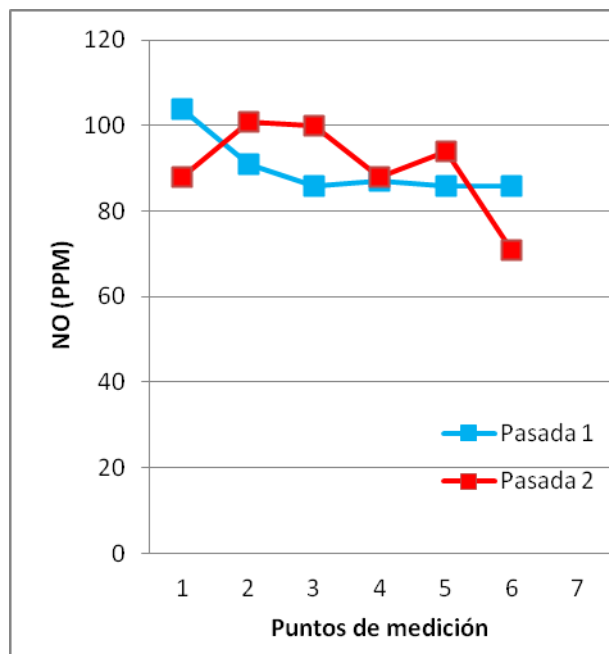


Figura 42. Concentración de óxido de nitrógeno del gas producto de combustión durante el proceso de secado.

### 3.5 Análisis económico y medioambiental de obtención del combustible

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el secado y combustión del orujo de aceituna, se puede deducir que este residuo sería un buen combustible desde el punto de vista térmico y económico. En cuanto a la obtención del coste de combustible de biomasa, hay que tener en cuenta otros aspectos a considerar para la utilización de los subproductos y residuos como combustibles:

- La distribución y localización de los residuos.
- Los procesos de tratamiento previo necesarios para su aprovechamiento.

Un factor fundamental en la viabilidad del aprovechamiento energético es:

La proximidad entre los puntos de generación y consumo del residuo, precisamente el coste del transporte es un parámetro decisivo en el estudio de viabilidad

#### Coste combustible:

Se puede calcular el coste del orujo de aceituna y alperujo teniendo en cuenta los siguientes costes:

- **Precio de recogida:** Coste de la mano de obra necesaria para agrupar el residuo en el punto de generación.
- **Precio de carga:** Coste de mano de obra y maquinaria necesaria para colocar el residuo en el medio de transporte.
- **Precio de transporte:** Coste de desplazamiento desde su punto de generación hasta su punto de aprovechamiento.
- **Precio de tratamiento:** Coste de preparación del residuo para su utilización como combustible (trititación, separación, secado, etc.). Este último precio es el más elevado de todos, debido a los costes de las tecnologías que se utilizan para su tratamiento.

A continuación se expone el proceso general de tratamiento del alperujo (mezcla de orujo y alpechín) a modo de ejemplo real para considerar la importancia del precio de tratamiento:

1. La masa inicial de alperujo con un 65% de humedad aproximadamente, se verterá por gravedad en una balsa.

2. De la balsa se pasará la masa por una separadora pulpa-hueso en húmedo en la que se extraerá aproximadamente la mitad del hueso del alperujo húmedo.
3. Tras la separadora, el alperujo pasa a una almazara en la que se hace un repaso para extraer aceite de orujo de oliva. La almazara trabaja en tres fases, obteniendo aceite de orujo de oliva, alpechín y orujo con un 50% de humedad aproximadamente.
  - El aceite extraído de la masa repasada se almacena hasta su venta.
  - El orujo pasará a un secadero en el que se secará desde el 50% de humedad hasta 10 -15% obteniendo orujillo.
  - El orujillo obtenido se conducirá a una separadora pulpa-hueso en seco y de ahí pasará a un troje y el huesecillo a otro para su venta como combustible.
  - El alpechín se llevará a una torre de concentración, se pulverizará y se irá concentrando con el aire residual del secadero (140°C). El líquido final tiene una concentración del 50 ó 60 % del alpechín inicial.

Como resultado de este proceso de repaso del alperujo

- El aceite de orujo producido se vende a las industrias refinadoras.
- La pulpa de aceituna se destina a la producción de piensos.
- El hueso se vende como excelente combustible.
- El alpechín concentrado se destina a ser fertilizante orgánico.
- La energía eléctrica generada se destina al autoconsumo y venta a la distribuidora eléctrica.
- La incineración directa del alperujo en caldera de lecho fluidizado requiere del uso de un combustible adicional.
- Las extractoras prefieren aplicar antes los métodos clásicos de extracción que generan aceite de orujo y orujillo susceptible de ser quemado o gasificado.
- Se resalta su bajo impacto ambiental desde el punto de vista de las emisiones gaseosas (SO<sub>2</sub>).

Entonces con la suma de los precios mencionados se determina el coste total del combustible, orujo seco de aceituna (orujillo). Al día de hoy se vende el kg de orujo seco

de aceituna por un precio medio de 10 céntimos de euro, en el mercado Español. Todo esto está relacionado con las campañas anuales de producción de aceituna y de las condiciones climáticas. El aprovechamiento y la utilización del orujillo se pueden hacer al introducirlo directamente en estufas de pellet sin tener que convertirlo a pellet industrial. Por lo que, se obtiene un ahorro considerable del uso del orujillo en comparación con el uso del pellet. Teniendo en cuenta, que el precio actual del pellet es de 20 céntimos de euro por kg. Esta diferencia de precio es debida al proceso de elaboración del pellet.

El proceso de pelletización consiste en un proceso de compactación de material lignocelulósico de determinadas condiciones (granulometría y humedad menor del 12%) con el objeto de obtener cilindros de diámetro entre 7 y 22 mm y de longitud entre 2,2 cm a 7,0 cm. La compactación facilita la manipulación del combustible, ya que de esta manera se puede transportar mediante camiones cisterna y utilizar mangueras y depósitos como si de un fluido se tratase. Así mismo, se consigue un aumento de densidad energética, lo cual aumenta el valor energético del combustible por unidad de volumen. Los pellets están compuestos de restos de podas, talas o carpintería, por lo que para su fabricación no se necesita talar árboles, al tratarse por tanto de un material reaprovechado no se necesita talar árboles.

Una característica importante a tener en cuenta a la hora de decidirse por una estufa de pellets, en lugar de un estufa tradicional de leña, es que la primera tiene un rendimiento considerablemente mayor, ya que se puede dosificar, mientras que en la de leña solo se puede regular el fuego ahogándolo, lo cual disminuye mucho su rendimiento.

Por otra parte, Para evaluar las necesidades térmicas en el proceso de secado es necesario considerar las características de entrada del producto a secar (orujo de aceituna húmedo) y la humedad y temperatura final del producto seco (orujo de aceituna seco). Además, hay que tener en cuenta el rendimiento térmico con el que funciona el secadero de tipo tornillo sinfin (60%) y la demanda térmica para evaporar el agua (2,5 MJ/kg calor latente) y elevar la temperatura de la parte sólida del residuo (orujo de aceituna). Así, se demanda un aporte de 2,5 MJ por cada kg húmedo de orujo de aceituna (60% de humedad) que es introducido en el secadero.

Considerando la cantidad de calor a aportar y las propiedades energéticas del residuo utilizado, fundamentalmente su poder calorífico, se determina la cantidad necesaria para alimentar la estufa de combustión. Se tomará para la estufa un rendimiento medio del 80% y poder calorífico en base seca para el orujo de aceituna 22,6 MJ/kg y 15,04 MJ/kg en base húmeda. Entonces la cantidad necesaria de orujo de aceituna seco para ser quemado en el proceso de combustión-secado es de  $(2,5\text{MJ/kg}_{\text{agua}} * 60\% \text{ humedad} / 22,6 \text{ MJ/kg}_{\text{orujo}} = 0,0663 \text{ kg}_{\text{seco}})$  por cada kg de orujo húmedo que se quiere secar. Sin embargo si se emplea orujo húmedo, se necesita  $0.0997 \text{ kg}_{\text{húmedo}}$  para el mismo proceso de secado. Se deduce que el proceso de secado térmico es importante para reducir costes de residuos utilizados y minimizar el tiempo de secado.

En cuanto al potencial de los residuos, se destacan los del café que podrían ser otro ejemplo real para el aprovechamiento energético. En Alentejo se generan cantidades importantes de residuos por el consumo diario del café. Para hacer una idea de la determinación del potencial energético de los mismos, se expone el procedimiento:

$$\begin{aligned} \text{Consumo de café en Alentejo (kg/año)} &= \text{n}^\circ \text{ Habitantes} * \text{consumo anual} \\ &= 757\,190 \text{ habitantes} * 1,3 \text{ kg/cápita anual} = 984\,347 \text{ kg/año} \\ \text{Potencial energético de residuos del café en Alentejo} &= \text{consumo (kg/año)} * \text{PCS} \\ &= 984\,347 \text{ kg/año} * 4\,759,99 \text{ kcal/kg} \\ &= 4\,685\,481\,876,53 \text{ kcal/año} = 70\,622 \text{ GWh/año} \end{aligned}$$

#### 4 CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

En la presente Tesis de Máster se ha centrado el estudio de la evaluación de las características de los diferentes residuos que se encuentran en Alentejo, con el objeto de su empleo como combustible no contaminante. Se han caracterizado varias muestras de esos residuos mediante los análisis inmediato, elemental y las cenizas, y posteriormente se ha determinado el poder calorífico de los mismos.

También se ha realizado el cálculo térmico para la producción del comportamiento del secadero. Del balance energético se ha obtenido la cantidad de calor que tiene el gas caliente procedente de la combustión del orujo. Posteriormente, con este dato, se ha obtenido el coeficiente global de transmisión de calor basado en la superficie interior del secadero. Todo esto para estimar la longitud necesaria de secado, teniendo en cuenta que se ha considerado un diámetro de 20 cm del tambor del secadero, obteniendo la longitud necesaria del secadero de 1 m.

Posteriormente, se han realizado una serie de ensayos experimentales en la instalación de secado y combustión, para el orujo de aceituna. De los resultados, se ha observado que la pérdida de peso es mayor en la primera pasada mientras en la última pasada es menor. Esto es debido a que la humedad superficial del orujo se pierde rápidamente en las primeras pasadas y posteriormente se pierde la humedad del interior de la masa del orujo lentamente, debido a la dificultad de evaporación del agua retenida en el interior de la estructura molecular del orujo. La máxima reducción del contenido de la humedad del orujo de aceituna en algunos ensayos de secado, ha tenido un valor máximo del orden de 81%. También, los resultados obtenidos en el proceso de combustión y secado mostraron que la temperatura de los gases de combustión (humos) disminuye en su recorrido en el interior del secadero, debido al proceso de cesión de calor y a la pérdida calorífica. Por otro lado el orujo de aceituna seco, obtenido en el proceso de secado, tiene un poder calorífico superior de un valor medio de 17 MJ/kg, que sería utilizado como un buen combustible no contaminante en aplicaciones de combustión directa en calderas tanto para calefacción y agua caliente sanitaria como para la producción de vapor en centrales térmicas de producción de energía eléctrica.

Del análisis económico realizado se ha determinado un precio orientativo de la venta del orujo de aceituna de 0,10 €/kg.

Finalmente, los trabajos futuros podrían ser desarrollados en la instalación de combustión-secado en diferentes formas. Una posibilidad sería repetir el proceso seguido en los experimentos con diferentes velocidades de giro del sinfín del secadero para modificar el tiempo de secado. Por otra parte, otros trabajos que podrían ser desarrollados como el proceso de torrefacción de los residuos de biomasa, con el objeto de estudiar sus características físico-químicas y determinar su poder calorífico. Se prevé que los residuos que se obtienen de la torrefacción tendrán mayor poder calorífico. Estudios futuros para el desarrollo de un sistema integral de gestión para la reutilización de las cenizas de combustión de biomasa, base del sistema de gestión. Valorización de la aplicación de cenizas de biomasa en campos distintos a las infraestructuras de transporte lineal.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA, Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases 1990 – 2009, Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol, Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora, 2011.

BP, Statistical Review of World Energy, June 2011.

Cátia Gonçalves, Célia Alves, C. Pio, Inventory of fine particulate organic compound emissions from residential wood combustion in Portugal, *Atmospheric Environment* 2012; 50: 297-306.

CCE, Decisão da Comissão das Comunidades Europeias 130, de 26 de fevereiro, *Jornal Oficial da União Europeia*, 2004.

CCE, Comunicação da Comissão das Comunidades Europeias, Plano de Acção Biomassa, Bruxelas, 2005.

CCE, Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu, An Energy Policy for Europe. COM (2007) 1 final, Bruxelas, 2007.

Changdong Sheng, y J.L.T. Azevedo, Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, *Biomass and Bioenergy* 2005; 28: 499–507.

Chapman J.A., Transmisión del calor, GREFORL, Madrid, 1990.

DGEG, Direção Geral de Energia e Geologia, Portugal, 2011.

Diretiva 2009/28/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril de 2009 – Promoção da eletricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno de eletricidade.

EDILKAMIN, Manual de operación de la estufa modelo Iris de pellet.

EEA, Energy and Environmental in the European Union - Tracking progress towards integration, Copenhaga: EEA Report n.º.8/2006, 2006.

EEA (2008a), Energy and environment report 2008, Copenhaga: Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.

EEA (2011a), Air pollution by ozone across Europe during summer 2010, EEA Technical report No6/2011, European Environment Agency, 2011.

EEA (2011c), NEC Directive status report 2010, Reporting by the Member States under Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants, EEA Technical report No 3/2011, European Environment Agency, 2011.

EEA (2011d), European Union emission inventory report 1990–2009 under the UNECE Convention on Long range Transboundary Air Pollution (LRTAP) EEA Technical report No 9/2011, European Environment Agency, 2011.

EEA (2011f), Air quality in Europe — 2011 report, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. ISBN: 978-92-9213-232-3, 2011.

Esteban L.S. y Carrasco J.E., Biomass resources and costs: Assessment in different EU countries, *Biomass and bioenergy* 2011; 35: S21-S30.

Fernandes U., Costa M., Potential of bio mass residues for energy production and utilization in a region of Portugal, *Biomass & Bioenergy* 2010; 34: 661–666.

HOBERSAL, Manual de operaciones de horno mufla.

INGETECSA, Ingeniería y Técnica del Secado, S.A., Barcelona, España.

ITISE Lda, Thermo Scientific Niton product distributor for Portugal.

Jorge Gominho, Ana Lourenc, Isabel Miranda, H. Pereira, Chemical and fuel properties of stumps biomass from Eucalyptus globules Plantations, *Industrial Crops and Products* 2012; 39: 12– 16.

KERN, Manual técnico de analizador halógeno de humedad (DBS 60-3 KERN).

Kneule F., El secado, Ed. Urmo, Bilbao, 1984.

MEE, National Long-Term Programme to Encourage the Use of Biomass for the Period 2008-2020, Sofia: Ministry of Economy and Energy, 2008.

Parr 1351, Manual de funcionamiento de Calorímetro modelo Parr 1351.

Real Decreto 62/2006 del 21 Marzo, Pág. web: <http://www.dre.pt>.

Real Decreto 66/2006 del 22 Marzo, Pág. web: <http://www.dre.pt>.

Rede Elétrica Nacional (REN), Dados Técnicos 2011, Valores Provisórios, REN, S.A. Lisboa, 2011, 1-3.

REHES, Renewable Energy for Heat Supply in Dwellings with Individual and Local Heatings Systems. D6 – Report on the biomass and solar energy potential: Bulgaria, China, Romania, Turkey, March 2007.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 24/2010, de 1 de abril – Aprova a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas de 2010 (EN AAC).

Resolución Ministerial n.º.169/2005 del 24 Octubre, Pág. Web: <http://www.dre.pt>.

Robert Samuelssona, Jan Burvalla, Raida Jirjis, Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass, *Biomass & Bioenergy* 2006; 30: 929–934.

Rosa M. Seabra, Paula B. Andrade, Patrícia Valentão, Miguel Faria, Alistair G. Paice, Maria Beatriz P.P. Oliveira, Chapter 20 - Phenolic Profiles of Portuguese Olives: Cultivar and Geographics, *Olives and Olive Oil in Health and Disease Prevention 2010*; 177-186.

Sergio Ferreira, Nuno Afonso Moreira, Eliseu Monteiro, Bioenergy overview for Portugal, *Biomass & Bioenergy* 2009; 33: 1567–1576.

Stupak, I., Asikainen, A., Jonsell, M., Karlton, E., Lunnan, A., Mizaraite, D., et al. Sustainable utilization of forest biomass for energy – Possibilities and problems: Policy, legislation, certification, and recommendations and guidelines in the Nordic, Baltic, and other European countries. *Biomass & Bioenergy* 2007; 31: 666-684.

Telmo C., Lousada J., Moreira N., Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of Wood, *Bioresource Technology* 2010; 101: 3808–3815.

Testo 335, Manual técnico de operación de uso.

Viana H., Vega-Nieva D.J., Ortiz Torres L., Lousada J., Aranha J., Fuel characterization and biomass combustion properties of selected native woody shrub species from central Portugal and NW Spain, *Fuel* 2012; 102: 737-745.

Viana H., Warren B. Cohen, D. Lopes, J. Aranha, Assessment of forest biomass for use as energy. GIS-based analysis of geographical availability and locations of wood-fired power plants in Portugal, *Applied Energy* 2010; 87(8): 2551-2560.

#### **Algunas páginas web buscadas:**

[http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIIG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/publicaciones/bistua\\_revista\\_ciencias\\_basica/2008\\_1/15042010/art\\_03.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/bistua_revista_ciencias_basica/2008_1/15042010/art_03.pdf)

[http://ciencia.urjc.es/bitstream/10115/7900/1/09-10\\_Risco,Manzano\\_Carolina.pdf](http://ciencia.urjc.es/bitstream/10115/7900/1/09-10_Risco,Manzano_Carolina.pdf)

[http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=le%C3%B1a%20como%20combustible%20dom%C3%A9stico%20en%20zonas%20rurales%20de%20usme&source=web&cd=1&ved=0CCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F3898548.pdf&ei=0Mr1UOaPHMjQhAfEtoDQDQ&usg=AFQjCNFUeQR0m-BVWqc7ND6\\_zCYBkU5Kzw&bvm=bv.41018144,d.ZG4&cad=rja](http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=le%C3%B1a%20como%20combustible%20dom%C3%A9stico%20en%20zonas%20rurales%20de%20usme&source=web&cd=1&ved=0CCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F3898548.pdf&ei=0Mr1UOaPHMjQhAfEtoDQDQ&usg=AFQjCNFUeQR0m-BVWqc7ND6_zCYBkU5Kzw&bvm=bv.41018144,d.ZG4&cad=rja)

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Alentejo>

**ANEXOS****Anexo I.**

Análisis inmediato

BIOMASA: Miscanthus

Cenizas

Muestra	M1	M2	M3	% Cenizas	Media	% Dispersión
1	16,6760	17,7450	16,7059	2,80	2,67	11,63
2	13,0669	14,1692	13,0971	2,74		
3	13,2033	14,3377	13,2315	2,49		

**Humedad**

Muestra	M1	M2	M3	% Humedad	Media	% Dispersión
1	9,0388	10,1357	10,0153	10,98	10,99	2,64
2	8,5451	9,5579	9,4480	10,85		
3	11,0199	12,0306	11,9180	11,14		

**Volátiles**

Muestra	M1	M2	M3	% Volátiles	Media	%Dispersión
1	14,4505	15,5132	14,6509	70,15	70,09	1,40
2	14,5587	15,6309	14,7567	70,54		
3	14,5987	15,6513	14,8034	69,56		

**Carbono Fijo y Poder Calorífico Superior**

% Cenizas	% Humedad	% Volátiles	% Carbono f.
2,67	10,99	70,09	16,25

Análisis inmediato

BIOMASA: Residuos  
del café

### Cenizas

Muestra	M1	M2	M3	% Cenizas	Media	% Dispersión
1	13,3134	14,4799	13,4168	8,86	8,36	9,11
2	13,0674	14,3318	13,1699	8,11		
3	13,6923	14,7080	13,7746	8,10		

### Humedad

Muestra	M1	M2	M3	% Humedad	Media	% Dispersión
1	8,5919	9,9151	9,6369	21,02	21,94	7,65
2	8,5451	9,6846	9,4259	22,70		
3	11,0195	12,2801	12,0016	22,09		

### Volátiles

Muestra	M1	M2	M3	% Volátiles	Media	%Dispersión
1	14,3467	15,4483	14,5811	56,78	57,24	2,10
2	14,7160	15,7985	14,9333	57,99		
3	14,9030	15,9754	15,1294	56,95		

### Carbono Fijo y Poder Calorífico Superior

% Cenizas	% Humedad	% Volátiles	% Carbono f.
8,36	21,94	57,24	12,46

Análisis inmediato

BIOMASA: Orujo de Uva

### Cenizas

Muestra	M1	M2	M3	% Cenizas	Media	% Dispersión
1	16,7764	17,9172	16,8008	2,14	2,16	1,70
2	13,3107	14,3608	13,3333	2,15		
3	12,2220	13,2425	12,2442	2,18		

### Humedad

Muestra	M1	M2	M3	% Humedad	Media	% Dispersión
1	9,8873	10,8992	10,3774	51,57	53,15	6,01
2	9,7700	10,7950	10,2506	53,11		
3	10,0478	11,1510	10,5469	54,76		

### Volátiles

Muestra	M1	M2	M3	% Volátiles	Media	%Dispersión
1	14,8164	15,8280	14,9678	31,89	32,62	4,06
2	14,7679	15,8492	14,9154	33,21		
3	14,5060	15,5154	14,6484	32,75		

### Carbono Fijo y Poder Calorífico Superior

% Cenizas	% Humedad	% Volátiles	% Carbono f.
2,16	53,15	32,62	12,08

Análisis inmediato

BIOMASA: Poda  
(Sarmiento)

#### Cenizas

Muestra	M1	M2	M3	% Cenizas	Media	% Dispersión
1	16,6781	17,6799	16,7067	2,85	2,68	18,91
2	11,0753	12,1016	11,0994	2,35		
3	13,6455	14,6975	13,6753	2,83		

#### Humedad

Muestra	M1	M2	M3	% Humedad	Media	% Dispersión
1	9,2652	10,4632	10,2839	14,97	15,38	4,69
2	10,8218	11,8276	11,6717	15,50		
3	10,0476	11,0586	10,9000	15,69		

#### Volátiles

Muestra	M1	M2	M3	% Volátiles	Media	%Dispersión
1	14,9128	15,9190	15,0941	66,60	66,89	1,37
2	14,2800	15,2745	14,4502	67,50		
3	14,6245	15,6150	14,8031	66,58		

#### Carbono Fijo y Poder Calorífico Superior

% Cenizas	% Humedad	% Volátiles	% Carbono f.
2,68	15,38	66,89	15,04

Análisis inmediato

BIOMASA: Orujo de Aceituna

**Cenizas**

Muestra	M1	M2	M3	% Cenizas	Media	% Dispersión
1	15,2910	16,2930	15,3002	0,92	0,83	20,56
2	13,6927	14,7372	13,7005	0,75		
3	14,3458	15,3631	14,3543	0,84		

**Carbono Fijo y Poder Calorífico Superior**

% Cenizas	% Humedad	% Volátiles	% Carbono f.
0,83	62,70	24,85	11,62

**Anexo II**

## Análisis elemental

## Orujo uva

PORCENTAJES TEÓRICOS (%)			
C	H	N	S
PORCENTAJES ENCONTRADOS (%)			
C 28.42	H 8.147	N 1.403	S 0.037
C 28.16	H 8.486	N 2.335	S 0.053
C 25.24	H 8.769	N 2.384	S 0.083

## Residuo café

PORCENTAJES TEÓRICOS (%)			
C	H	N	S
PORCENTAJES ENCONTRADOS (%)			
C 34.89	H 6.739	N 3.186	S 0.190
C 36.24	H 6.456	N 3.065	S 0.074
C 36.34	H 6.636	N 3.196	S 0.190

## Orujo aceituna

PORCENTAJES TEÓRICOS (%)			
C	H	N	S
PORCENTAJES ENCONTRADOS (%)			
C 30.31	H 8.752	N 2.885	S 0.058
C 30.51	H 8.237	N 1.918	S 0.052
C 27.89	H 8.547	N 2.287	S 0.020

## Sarmiento-poda

PORCENTAJES TEÓRICOS (%)			
C	H	N	S
PORCENTAJES ENCONTRADOS (%)			
C 27.16	H 7.569	N 0.997	S 0.017
C 29.02	H 6.785	N 1.092	S 0.028
C 26.67	H 6.394	N 1.073	S 0.011

## Caña –miscantus

PORCENTAJES TEÓRICOS (%)			
C	H	N	S
PORCENTAJES ENCONTRADOS (%)			
C 41.64	H 6.284	N 0.131	S 0.106
C 41.84	H 6.091	N 0.056	S 0.088
C 41.78	H 6.039	N 0.056	S 0.042

Determinación humedad:

MUESTRA	DETERMINACIÓN	RESULTADO	MÉTODO
Orujo uva	Humedad	44.9%	Gravimétrico
Residuo de Café	Humedad	27.4%	Gravimétrico
Orujo aceituna	Humedad	34.0%	Gravimétrico
Sarmiento-poda	Humedad	24.2%	Gravimétrico
Caña-miscants	Humedad	13.9%	Gravimétrico

Anexo III

Algunos resultados de combustión-secado

-----  
 V1.22      testo 335  
                  01535377/E  
 -----  
 Carpeta  
 Situación  
 04.04.2013      12:11:36  
 Combustible:      Pellets  
 O2ref.:            8.0%  
 CO2max:           20.7%  
 -----  
 142.8      °C Temp.Gas.com  
 23.0      °C TA  
 18.57      % O2  
 434      ppm CO  
 2.37      % CO2  
 8.45      % Lambda  
 64.4      % REN  
 35.6      % qA  
 -----  
 48      kg/h Caudal másic  
 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 % CO  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad      :  
 Promedio :      -----  
 Oleod      -----

-----  
 V1.22      testo 335  
                  01535377/E  
 -----  
 Carpeta  
 Situación  
 04.04.2013      12:15:53  
 Combustible:      Pellets  
 O2ref.:            8.0%  
 CO2max:           20.7%  
 -----  
 113.5      °C Temp.Gas.com  
 24.5      °C TA  
 15.84      % O2  
 230      ppm CO  
 5.07      % CO2  
 4.01      % Lambda  
 87.2      % REN  
 12.8      % qA  
 -----  
 86      kg/h Caudal másic  
 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 % CO  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad      :  
 Promedio :      -----  
 Oleod      -----

-----  
 V1.22      testo 335  
                  01535377/E  
 -----  
 Carpeta  
 Situación  
 04.04.2013      12:13:46  
 Combustible:      Pellets  
 O2ref.:            8.0%  
 CO2max:           20.7%  
 -----  
 184.6      °C Temp.Gas.com  
 23.6      °C TA  
 15.20      % O2  
 116      ppm CO  
 5.71      % CO2  
 3.58      % Lambda  
 79.6      % REN  
 20.4      % qA  
 -----  
 104      kg/h Caudal másic  
 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 % CO  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad      :  
 Promedio :      -----  
 Oleod      -----

-----  
 V1.22      testo 335  
                  01535377/E  
 -----  
 Carpeta  
 Situación  
 04.04.2013      11:53:10  
 Combustible:      Pellets  
 O2ref.:            8.0%  
 CO2max:           20.7%  
 -----  
 138.1      °C Temp.Gas.com  
 21.5      °C TA  
 16.85      % O2  
 162      ppm CO  
 4.08      % CO2  
 4.99      % Lambda  
 79.7      % REN  
 20.3      % qA  
 -----  
 86      kg/h Caudal másic  
 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 % CO  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad      :  
 Promedio :      -----  
 Oleod      -----

-----  
 V1.22      testo 335  
                  01535377/E  
 -----  
 Carpeta  
 Situación  
 04.04.2013      12:06:32  
 Combustible:      Pellets  
 O2ref.:            8.0%  
 CO2max:           20.7%  
 -----  
 137.0      °C Temp.Gas.com  
 23.1      °C TA  
 20.43      % O2  
 20      ppm CO  
 -----  
 % CO2  
 -----  
 % Lambda  
 -----  
 % REN  
 -----  
 % qA  
 -----  
 10      kg/h Caudal másic  
 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 % CO  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad      :  
 Promedio :      -----  
 Oleod      -----

-----  
 V1.22      testo 335  
                  01535377/E  
 -----  
 Carpeta  
 Situación  
 04.04.2013      12:09:50  
 Combustible:      Pellets  
 O2ref.:            8.0%  
 CO2max:           20.7%  
 -----  
 134.5      °C Temp.Gas.com  
 23.4      °C TA  
 14.63      % O2  
 134      ppm CO  
 6.27      % CO2  
 3.26      % Lambda  
 87.0      % REN  
 13.0      % qA

Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%

---

86.3 °C Temp.Gas.com  
 21.2 °C TA  
 16.56 % O2  
 143 ppm CO  
 4.37 % CO2  
 4.66 Lambda  
 89.3 % REN  
 10.7 % qA

---

kg/h Caudal másic  
 95 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 0 % CO  
 Pa Presión Dife

---

Número de opacidad :  
 Promedio :  
 Oleod

VI.22 testo 335 01535377/E

Carpeta

Situación  
 12.04.2013 11:31:06  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%

---

76.5 °C Temp.Gas.com  
 20.9 °C TA  
 16.98 % O2  
 68 ppm CO  
 3.96 % CO2  
 5.15 Lambda  
 90.0 % REN  
 10.0 % qA

---

kg/h Caudal másic  
 94 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 0 % CO  
 Pa Presión Dife

---

Número de opacidad :  
 Promedio :  
 Oleod

VI.22 testo 335 01535377/E

Carpeta

Situación  
 12.04.2013 11:31:59  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%

---

60.9 °C Temp.Gas.com  
 22.3 °C TA  
 20.81 % O2  
 1 ppm CO  
 % CO2  
 % Lambda  
 % REN  
 % qA

---

kg/h Caudal másic  
 5 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 0 % CO  
 Pa Presión Dife

---

Número de opacidad :  
 Promedio :  
 Oleod

Número de opacidad :  
 Promedio :  
 Oleod

---

VI.22 testo 335 01535377/E

Carpeta

Situación  
 12.04.2013 11:29:44  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%

---

114.2 °C Temp.Gas.com  
 21.3 °C TA  
 18.45 % O2  
 279 ppm CO  
 2.50 % CO2  
 8.08 Lambda  
 73.8 % REN  
 26.2 % qA

---

kg/h Caudal másic  
 49 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 0 % CO  
 Pa Presión Dife

---

Número de opacidad :  
 Promedio :  
 Oleod

VI.22 testo 335 01535377/E

Carpeta

Situación  
 12.04.2013 11:30:29  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%

---

86.3 °C Temp.Gas.com  
 21.2 °C TA  
 16.56 % O2  
 143 ppm CO  
 4.37 % CO2  
 4.66 Lambda  
 89.3 % REN  
 10.7 % qA

---

kg/h Caudal másic  
 95 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 0 % CO  
 Pa Presión Dife

---

Número de opacidad :  
 Promedio :  
 Oleod

VI.22 testo 335 01535377/E

Carpeta

Situación  
 12.04.2013 11:31:06  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%

---

76.5 °C Temp.Gas.com  
 20.9 °C TA  
 16.98 % O2  
 68 ppm CO  
 3.96 % CO2  
 5.15 Lambda  
 90.0 % REN  
 10.0 % qA

---

kg/h Caudal másic  
 94 ppm NO

*Palada A*

VI.22 testo 335 01535377/E

Carpeta

Situación  
 12.04.2013 11:26:23  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%

---

165.4 °C Temp.Gas.com  
 19.9 °C TA  
 15.71 % O2  
 100 ppm CO  
 5.21 % CO2  
 3.92 Lambda  
 79.9 % REN  
 20.1 % qA

---

kg/h Caudal másic  
 112 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 0 % CO  
 Pa Presión Dife

---

Número de opacidad :  
 Promedio :  
 Oleod

VI.22 testo 335 01535377/E

Carpeta

Situación  
 12.04.2013 11:27:37  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%

---

145.5 °C Temp.Gas.com  
 20.3 °C TA  
 17.04 % O2  
 186 ppm CO  
 3.89 % CO2  
 5.22 Lambda  
 77.1 % REN  
 22.9 % qA

---

kg/h Caudal másic  
 82 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 0 % CO  
 Pa Presión Dife

---

Número de opacidad :  
 Promedio :  
 Oleod

VI.22 testo 335 01535377/E

Carpeta

Situación  
 12.04.2013 11:28:45  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%

---

118.9 °C Temp.Gas.com  
 21.7 °C TA  
 16.20 % O2  
 429 ppm CO  
 2.73 % CO2  
 7.34 Lambda  
 74.6 % REN  
 25.4 % qA

---

kg/h Caudal másic  
 68 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 0 % CO  
 Pa Presión Dife

---

Número de opacidad :

-----  
 V1.22 testo 335  
 01535377/E  
 Carpeta  
 Situación 11:40:20  
 12.04.2013 Pellets  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%  
 -----  
 79.0 °C Temp.Gas.com  
 22.4 °C TA  
 17.62 % O2  
 231 ppm CO  
 3.32 % CO2  
 6.11 % Lambda  
 87.7 % REN  
 12.3 % qA  
 -----  
 kg/h Caudal másic  
 71 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 -----  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad :  
 -----

-----  
 V1.22 testo 335  
 01535377/E  
 Carpeta  
 Situación 11:41:34  
 12.04.2013 Pellets  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%  
 -----  
 63.8 °C Temp.Gas.com  
 20.9 °C TA  
 20.84 % O2  
 1 ppm CO  
 % CO2  
 % Lambda  
 % REN  
 % qA  
 -----  
 kg/h Caudal másic  
 4 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 -----  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad :  
 -----  
 Promedio :  
 Oleod -----

-----  
 V1.22 testo 335  
 01535377/E  
 Carpeta  
 Situación 11:38:21  
 12.04.2013 Pellets  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%  
 -----  
 120.4 °C Temp.Gas.com  
 21.3 °C TA  
 16.93 % O2  
 143 ppm CO  
 4.00 % CO2  
 5.09 % Lambda  
 82.4 % REN  
 17.6 % qA  
 -----  
 kg/h Caudal másic  
 88 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 -----  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad :  
 -----  
 Promedio :  
 Oleod -----

-----  
 V1.22 testo 335  
 01535377/E  
 Carpeta  
 Situación 11:39:19  
 12.04.2013 Pellets  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%  
 -----  
 93.5 °C Temp.Gas.com  
 21.5 °C TA  
 16.32 % O2  
 133 ppm CO  
 4.61 % CO2  
 4.43 % Lambda  
 88.8 % REN  
 11.2 % qA  
 -----  
 kg/h Caudal másic  
 94 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 -----  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad :  
 -----  
 Promedio :  
 Oleod -----

-----  
 V1.22 testo 335  
 01535377/E  
 Carpeta  
 Situación 11:40:20  
 12.04.2013 Pellets  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%  
 -----  
 79.0 °C Temp.Gas.com  
 22.4 °C TA  
 17.62 % O2  
 231 ppm CO  
 3.32 % CO2  
 6.11 % Lambda  
 87.7 % REN  
 12.3 % qA  
 -----  
 kg/h Caudal másic  
 71 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 -----

-----  
 V1.22 testo 335  
 01535377/E  
 Carpeta  
 Situación 11:35:11  
 12.04.2013 Pellets  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%  
 -----  
 170.4 °C Temp.Gas.com  
 19.9 °C TA  
 16.22 % O2  
 86 ppm CO  
 4.71 % CO2  
 4.34 % Lambda  
 77.2 % REN  
 22.8 % qA  
 -----  
 kg/h Caudal másic  
 88 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 -----  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad :  
 -----  
 Promedio :  
 Oleod -----

-----  
 V1.22 testo 335  
 01535377/E  
 Carpeta  
 Situación 11:36:21  
 12.04.2013 Pellets  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%  
 -----  
 150.4 °C Temp.Gas.com  
 21.6 °C TA  
 16.34 % O2  
 93 ppm CO  
 4.59 % CO2  
 4.45 % Lambda  
 80.0 % REN  
 20.0 % qA  
 -----  
 kg/h Caudal másic  
 101 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 -----  
 Pa Presión Dife  
 -----  
 Número de opacidad :  
 -----  
 Promedio :  
 Oleod -----

-----  
 V1.22 testo 335  
 01535377/E  
 Carpeta  
 Situación 11:37:21  
 12.04.2013 Pellets  
 Combustible: Pellets  
 O2ref.: 8.0%  
 CO2max: 20.7%  
 -----  
 130.7 °C Temp.Gas.com  
 21.6 °C TA  
 15.77 % O2  
 75 ppm CO  
 5.15 % CO2  
 3.97 % Lambda  
 84.8 % REN  
 15.2 % qA  
 -----  
 kg/h Caudal másic  
 107 ppm NO  
 m/s Velocidad  
 -----  
 Pa Presión Dife  
 -----