

# ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE SECADO DE “ALPERUJO” Y POSIBILIDAD DE IGNICIÓN EN EL INTERIOR DEL SECADERO

FONSECA GONZÁLEZ, Natalia <sup>(1)</sup>; CASANOVA KINDELÁN, Jesús <sup>(1)</sup>

natalia.fonseca@upm.es

<sup>(1)</sup>Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. de Minas y Energía, Departamento de Energía y Combustibles

<sup>(2)</sup> Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Industriales, Departamento de Ingeniería Energética

## RESUMEN

El “alperujo” es una mezcla de componentes provenientes del proceso de extracción de aceite de oliva en las almazaras que utilizan proceso de centrifugación en dos fases. El alperujo, por ser una mezcla de huesos, pulpa y piel de las aceitunas, tiene un elevado contenido energético, pero también un alto contenido de humedad, que hace que sea necesario un proceso de secado para su posterior valorización energética.

En este trabajo se presentan los cálculos realizados sobre el proceso de secado de alperujo en un secadero rotativo que utiliza la acción directa de los gases de escape de una turbina de gas, la cual produce energía eléctrica en un sistema de cogeneración. El objeto de estos cálculos es doble. Por una parte se trata de predecir las temperaturas y grados de humedad del material sólido que simultáneamente se está calentando y secando; y del gas que circula por el interior del secadero, que se está enfriando y está aumentando su contenido en agua. Por otra parte, se trata estudiar la posibilidad de ignición en el interior del secadero.

Para ello se hace una predicción de la composición de los gases de escape de la turbina y se resuelven las ecuaciones del proceso de evaporación del contenido de agua y de la evolución de la composición de los gases circundantes durante el secado hasta los ciclones finales de filtrado. Se parte de la composición del alperujo presentada por otros autores y de propiedades obtenidas por los autores.

En base a los resultados obtenidos y a los resultados de ensayos de ignición en capa y en polvo que se han realizado siguiendo la norma EN 50281-2-1:1998, se presentan las conclusiones de un análisis de la posibilidad de que el alperujo seco o el polvo depositado en los filtros de saluda de un secadero pudieran entrar en ignición.

**Palabras clave:** alperujo, secado de biomasa, ignición de biomasa.

## 1. Introducción

El alperujo es una mezcla de huesos, pulpa y piel de las olivas tras el proceso de extracción del aceite de oliva en las almazaras basado en la centrifugación en dos fases. Su composición es básicamente los huesos, parte de la pulpa o mesocarpio y la piel, formado por lignina, celulosa y hemicelulosa, con importante contenido de agua (entre un 60 y un 75%) y una pequeña parte de aceite residual [1]. Una de las opciones para la valorización de este tipo de residuos es su combustión directa en calderas de biomasa para aportar calor a un ciclo de Rankine de vapor de agua [7]. Para ello es necesario un proceso de secado previo para reducir su humedad al 10 % m/m. El secado por evaporación, el más ampliamente utilizado, consiste en aportar energía térmica correspondiente al calor latente de vaporización del agua [2].

Para el secado del alperujo, primero se acumula en balsas al aire libre para eliminar parte de la humedad por evaporación natural y luego terminar el proceso de secado en un secadero de aire caliente. Los secaderos comúnmente utilizados son de tipo rotativo (tromel) y en este caso se analiza uno de tipo equicorriente.

El aire caliente que aporta la energía térmica al proceso de secado puede provenir tanto de un proceso de combustión directa como de los gases de escape de un motor de combustión interna, constituyendo en este último caso una planta de cogeneración. La implantación cada vez creciente de este tipo de plantas para la valorización energética de residuos agroforestales, hace necesario la realización de estudios de evaluación del riesgo de incendio, pues en general es bien conocido que la biomasa puede entrar en combustión si se cumplen ciertas condiciones [4 y 5].

El objetivo de esta ponencia es el análisis termodinámico del proceso de secado del alperujo con los gases calientes de una turbina de gas para determinar las temperaturas del alperujo y de los gases de combustión al final del proceso de secado. Con estos se estudiarán las condiciones necesarias para una posible ignición dentro de los filtros ciclónicos, utilizando los resultados experimentales de los ensayos normalizados de temperaturas de ignición en polvo y en capa (EN 50281-2-1:1998), de muestras de alperujo y de polvo de alperujo de los ciclones de limpieza de los gases del secadero.

## 2. Descripción de la planta

La planta de secado del alperujo proveniente de las balsas, recibe el gas de escape de la turbina de gas que consume gas natural como combustible y que acciona el alternador. Para el caso de estudio, se ha considerado una turbina de gas Solar Turbines modelo Titan de 15 MW. La turbina de gas, en condiciones nominales ISO (aire exterior a 15°C), tiene relación de compresión de 17, temperatura de combustión 1300 °C, una relación potencia eléctrica/potencia térmica de 10,23 MJ/kWh, con un caudal de gases de escape de 49,8 kg/s y temperatura de los gases de escape 495 °C. En la figura 1, se muestran las curvas características de la turbina considerada para el estudio.

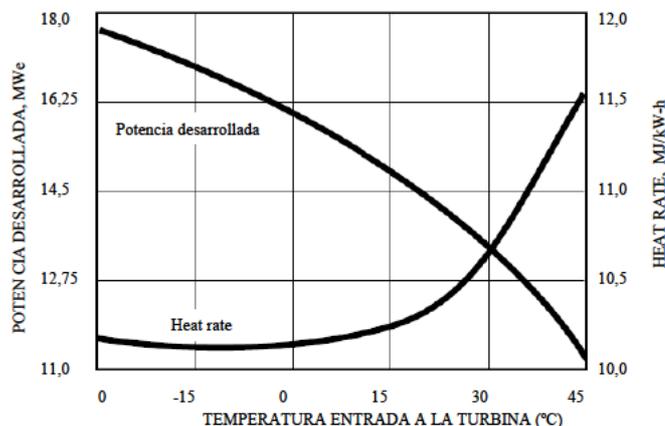


Figura 1: Curvas características de la turbina de gas Solar Turbines modelo Titan 130.

El alperujo de alto contenido de humedad se mezcla con alperujo semi-seco (20% de humedad, que proviene de la línea de secado previo) para aprovechar mucho mejor el aire caliente proveniente de la turbina, y proporcionando un producto con humedad en torno al 50% que se lleva a la entrada de las líneas de secado previo. El alperujo semiseco se envía a la línea de secado final donde se termina el proceso de secado hasta un valor de humedad de entre el 8 y el 10 %.

En cada uno de los secaderos rotativos tipo trómel, el producto a secar y los gases de combustión de la turbina se introducen por la parte delantera de forma que el gas de secado a mayor temperatura (400 – 450 °C) esté en contacto con el producto cuando este tiene el mayor contenido de humedad.

A la salida de cada uno de los trómel, se separa el alperujo de los gases de combustión, los cuales son enviados a la chimenea por medio de un ventilador de tiro inducido previo paso por un sistema de filtros ciclónicos. Los ciclones toman el gas de la parte alta de la zona final de cada secadero y evitan la expulsión a la atmósfera del polvo de alperujo, que por tener una baja granulometría quedan en suspensión y son arrastradas por la corriente de gases al atravesar el trómel.

### 3. Análisis termodinámico del proceso de secado

#### 3.1. Consideraciones generales

Los procesos de secado de materiales con alto contenido de agua como el alperujo, se basa en aportar energía térmica para que, al elevar su temperatura, aumente la presión de vapor del agua contenida y con ello pase de la fase líquida a la fase vapor (evaporación o vaporización). La energía aportada al proceso de secado por la fuente de calor, en este caso los gases calientes provenientes de una turbina de gas, se emplea por una parte en elevar la temperatura de la biomasa, tanto de la parte seca como del agua contenida, y por otra en aportar al agua el calor latente de vaporización.

Para mejorar la transferencia de calor y el transporte de masa de agua entre el alperujo y el gas de secado, en este tipo de secaderos se induce una agitación y movimiento del alperujo sobre el gas de secado en base a un cilindro rotativo que al girar va mezclando el alperujo con el gas caliente. El alperujo en proceso de secado va cayendo sobre el gas de secado, recibiendo calor y cediendo vapor de agua.

Una parte del agua contenida en el alperujo está en forma líquida rodeando a las partículas del alperujo (pulpa, piel y huesos) formando una “sopa” de aspecto más o menos fluido, pero otra parte está absorbida en las propias partículas que componen el alperujo, que tienen diámetros equivalentes menores de 3 mm y son porosas como la mayor parte de los materiales biomásicos. Por ello, el proceso de secado implica tanto la vaporización del agua libre no contenida en el interior de las partículas, como la extracción y vaporización del agua de las propias partículas. Este proceso comienza en la superficie de las mismas cuando el agua de la superficie se vaporiza, transfiriendo vapor de agua al gas y por tanto, desecando la superficie. Al producirse el secado de la superficie, se genera un mecanismo de transferencia de masa en el interior de las partículas que hace que progresivamente se va transfiriendo el agua contenida en la parte más interior hacia la superficie de la partícula, y de ahí por evaporación va pasando al entorno. La corriente de gas de secado recibe vapor de agua hasta alcanzar la saturación, condición en la cual la presión parcial del vapor de agua se corresponde con la presión de saturación del agua a esa temperatura. Conforme el proceso de vaporización se va desarrollando, va aumentando el contenido de vapor de agua en los gases. Debido a las altas temperaturas de dicho gas en los secaderos estudiados, la humedad relativa del gas no llega a la saturación y por lo tanto no hay peligro de condensar de nuevo el agua dentro del secadero.

La biomasa húmeda al entrar al secadero y entrar en contacto con gases calientes, empieza a aumentar su temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico que se da entre la corriente de gases y la atmósfera que rodean la biomasa, alcanzando esta última como máximo la temperatura de bulbo húmedo y manteniéndola prácticamente constante hasta que la biomasa pierde completamente la humedad. Esto se debe a que el agua, una vez alcanzada la temperatura de bulbo húmedo, roba el calor latente de vaporización, impidiendo el progresivo aumento de la temperatura de la biomasa. Cuando el alperujo

queda completamente libre de humedad, en contacto con los gases calientes, empieza de nuevo a aumentar su temperatura, hasta que se llegue al equilibrio térmico con la fuente de calor, o hasta que empiece el proceso de combustión al superar la temperatura de autoinflamación de la biomasa. En la Figura 2, se observa cómo es la evolución de la temperatura de la biomasa conforme se desarrolla el proceso de secado.

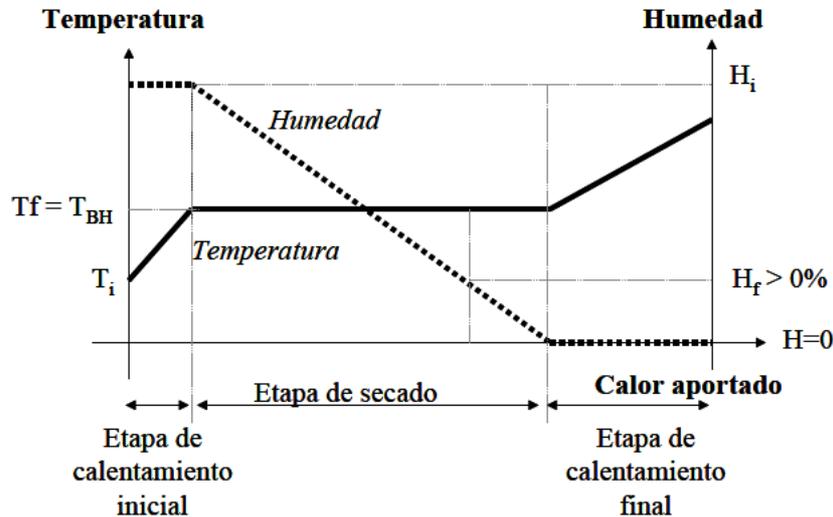


Figura 2: Proceso de secado de biomasa. Evolución de la temperatura y la humedad en relación al calor aportado.

### 3.2. Resultados del análisis termodinámico

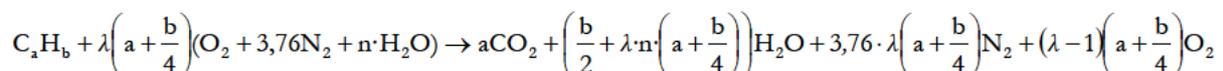
A continuación se expone un análisis termodinámico simplificado del proceso de secado de biomasa, con el fin de estudiar la posibilidad de ignición del alperujo antes de las chimeneas. Los cálculos se han realizado para la condición crítica de un día de verano donde la temperatura ambiente era muy elevada 37 °C con una baja humedad relativa (13 %). La Tabla 1 muestra la composición del gas natural.

Tabla 7: Composición y propiedades del gas natural.

Metano (CH <sub>4</sub> )	%	94,1	Nitrógeno	%	0,5
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	%	5	Peso molecular del combustible	g/mol	16,76
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	%	0,2	Poder calorífico inferior	MJ/m <sup>3</sup> N	38,34
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	%	0,2	Densidad	kg/m <sup>3</sup> N	0,78

### 3.3. Composición de los gases de escape

Se hace una predicción de la composición de los gases de escape a la salida de la turbina de gas usando la composición del gas natural de la Tabla 1, las condiciones atmosféricas y la relación aire-combustible ( $A/F$ ) calculada considerando que esta relación es igual a la que tiene la turbina de gas trabajando en condiciones nominales ISO (aire exterior a 15°C) en donde el caudal de gases de escape es igual a 49,8 kg/s, obteniendo una relación aire-combustible de 56,3. La composición de los gases de escape se calcula utilizando la siguiente expresión generalizada de combustión con exceso de aire.



Calculando previamente la composición elemental reducida del gas natural de la Tabla 1, siendo igual a  $C_{1,055}H_{4,1}$  y la composición del aire húmedo calculada teniendo en cuenta la humedad del aire atmosférico, siendo igual a  $O_2 + 3,76N_2 + 0,04 H_2O$ . De esta forma, la composición de los gases de salida de la turbina es aproximadamente (v/v): 76,4%  $N_2$ ; 3,14 %  $CO_2$ ; 14,1%  $O_2$  y 6,35% de  $H_2O$  con un peso molecular de 28,44 g/mol. Además habrá pequeñas cantidades de  $NO_x$ , y otros gases contaminantes que no afectan a este proceso.

### 3.4. La turbina de gas

En la turbina de gas, la temperatura del gas de escape está influenciada por las condiciones de temperatura y humedad del aire a la entrada, en este caso 37 °C y humedad relativa del 13 %. La temperatura de los gases se calcula en base a las curvas características de la turbina (Figura 1), considerando que la turbina está trabajando a plena carga. Para estas condiciones hay una producción de 12,45 MWe con un consumo específico de calor de 11,1 MJ/kWh. Para los cálculos se ha considerado los gases de escape según la composición calculada anteriormente y se han usado las tablas de entalpía para los diferentes gases considerando  $c_p$  variable. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 8: Resultados del cálculo de las condiciones de salida turbina de gas.

Parámetro	Fórmula	Unidad	Valor
Rendimiento efectivo	$\eta_e = \frac{3600[s/h]}{HR[kJ/kW\cdot h]}$	%	32,4
Consumo de combustible	$\dot{m}_f = \frac{P_e[kW] \cdot HR[kJ/kW\cdot h] \cdot \rho[kg/Nm^3]}{LHV_{GN}[MJ/Nm^3]}$	kg/s	0,78
Caudal de gases de escape	$\dot{m}_g = \dot{m}_f [kg/s] \cdot (A/F + 1)$	kg/s	44,7
Calor de los gases de escape	$Q_g = \frac{\dot{m}_f [kg/s] \cdot LHV_{GN}[kJ/Nm^3]}{\rho_{GN}[kg/Nm^3]} - P_e[kW]$	MW	25,9
Incremento de entalpía gases	$\Delta h_g = \frac{Q_g [kW]}{\dot{m}_g [kg/s]}$	kJ/kg	580
Temperatura gases de escape	Interpolación tablas de gases ideales	K	829

### 3.5. El secadero

Aunque las pérdidas de temperatura de los gases de escape desde que salen de la turbina de gas y entran al proceso de secado en las plantas reales suelen ser de más de 100 K, para este estudio se han considerado para estudiar el caso más crítico. Por lo tanto, si la temperatura ambiente es de 37 °C, con el incremento de entalpía en los gases de 580 kJ/kg, la temperatura de entrada de los gases al secadero de 556 °C (829 K).

Como las condiciones atmosféricas consideradas son de 37 °C y 13% de humedad relativa, el alperujo en las balsas a la intemperie, puede llegar a alcanzar una temperatura de 17,5 °C, que es la temperatura de bulbo húmedo correspondiente y por lo tanto esta será la temperatura de referencia que se ha tenido en cuenta para calcular la temperatura máxima que puede llegar a tener el alperujo en contacto con los gases calientes de la turbina de gas.

Los gases a 556 °C al entrar en contacto con el alperujo húmedo a 19 °C, pueden elevar su temperatura como máximo hasta la temperatura de bulbo húmedo correspondiente al incremento de entalpía de 580

kJ/kg, que es igual a 63,2 °C como se puede observar gráficamente en la Figura 3. En la Figura 4 se muestran los resultados de la humedad específica y la entalpía de los gases completamente saturados (humedad relativa del 100%) y por lo tanto, la temperatura corresponde a la temperatura de bulbo húmedo. Los valores de la Figura 4 se han calculado usando los datos de entalpía de cada uno de los gases, la composición volumétrica del gas de combustión y la presión de saturación del vapor para las diferentes temperaturas. Esta temperatura sólo se puede llegar a superar si el alperujo se seca completamente.

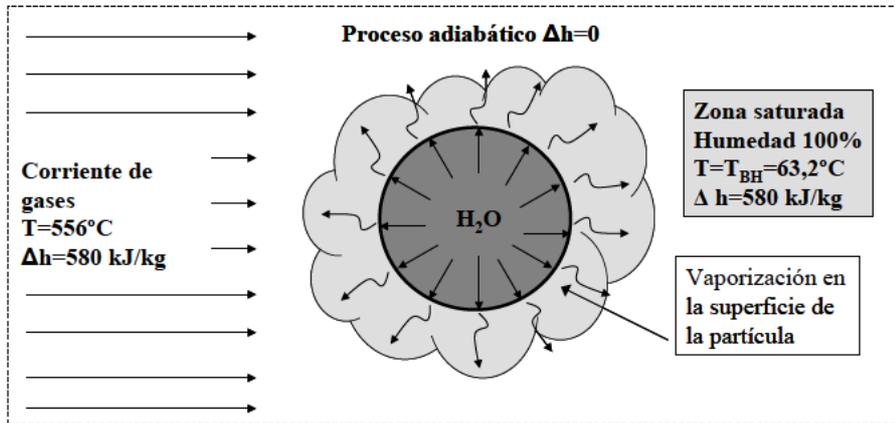


Figura 3: Dibujo explicativo de la máxima temperatura alcanzada por la biomasa húmeda

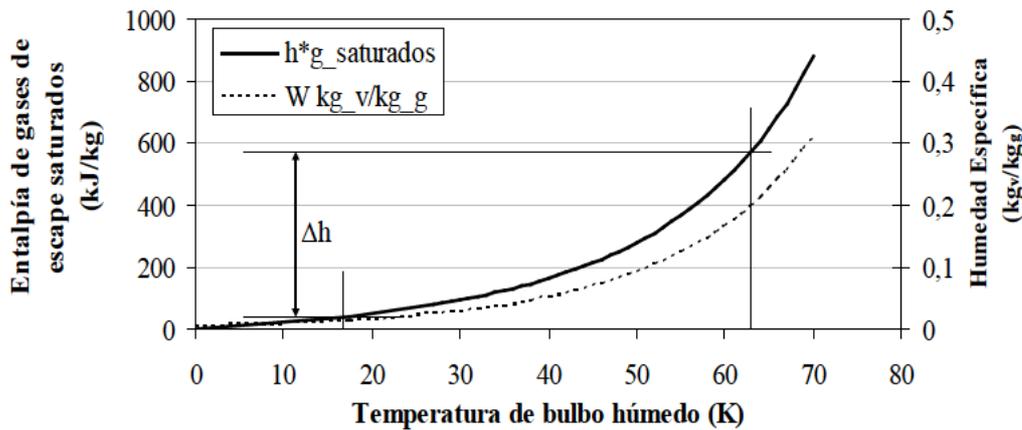


Figura 4: Entalpía y humedad específica para gases de combustión con 100% de humedad relativa

## 6. Consideraciones sobre la posibilidad de inflamación del alperujo en el secadero

La inflamación del alperujo se entiende como el comienzo (ignición) de la reacción química de oxidación (combustión) de la materia orgánica del alperujo [6]. Por lo tanto, para determinar el riesgo de autoignición del alperujo, se ha realizado una serie de ensayos de laboratorio cuyos resultados se muestran en el siguiente apartado [3].

### 6.1. Propiedades de alperujo

Los ensayos de caracterización de la biomasa se realizaron en el Laboratorio Oficial Madariaga siguiendo la norma EN 50281-2-1:1998. Se realizaron ensayos sobre dos muestras de alperujo: una de alperujo seco, tomado a la salida de la línea de secado final y otra muestra de polvo de alperujo retenido en los separadores ciclónicos.

## 6.2. Resultados del alperujo seco

El objetivo del ensayo fue el de determinar la temperatura mínima de autoinflamación en capa del alperujo en la granulometría normal. Para su ensayo, la muestra se preparó con un secado de 72 horas en mufla a 70 °C, logrando una humedad final del 1,5 %.

El ensayo de mínima temperatura de inflamación en capa, se realizó conforme a la norma EN 50281-2-1:1998. Este ensayo se realiza con una muestra de materia formando una capa delgada de unos 5 mm sobre una placa que se calienta de forma controlada a una temperatura inicial de 400 °C por medio de una resistencia eléctrica. Si a esta temperatura no se detecta la combustión, aún después de varios ensayos, termina el ensayo y se registra este hecho, pues 400 °C es la temperatura máxima contemplada para estos ensayos. Por otro lado, si a 400 °C se detecta combustión, se inicia una nueva prueba, con material nuevo a una temperatura 10 K por debajo y así hasta que se encuentre una temperatura en la cual pasados 30 minutos, no se detecta la autoinflamación de la muestra. Se considera que ha tenido lugar una inflamación si se ha iniciado la incandescencia o la llama en el material, o si se ha medido en el ensayo una temperatura por encima de la temperatura de la superficie caliente establecida, que implica la existencia de reacción exotérmica.

Los resultados de este ensayo, demuestran que para que el alperujo seco entre en combustión debe alcanzar una temperatura de 330 °C.

## 6.3. Resultados del polvo de alperujo

El objetivo del ensayo fue el de determinar la temperatura mínima de autoinflamación de la fracción de menor granulometría del alperujo, puesto que esta fracción de alperujo podría entrar en combustión tanto si se hubiera depositado como una capa, como en el caso de ser arrastrada por una corriente de aire, formando una nube de polvo. Esta muestra de polvo de alperujo se ha extraído del tornillo sin fin que retira el material retenido en los filtros ciclónicos del sistema de secado.

Esta muestra de polvo de alperujo se sometió al ensayo de mínima temperatura de inflamación en capa (explicado anteriormente) y al ensayo de mínima temperatura de inflamación en nube, conforme a la norma EN 50281-2-1:1998. El ensayo de temperatura de inflamación en polvo se realiza dispersando una muestra el polvo en un horno ajustado inicialmente a 500 °C, si no se detecta inflamación se debe repetir el ensayo con una nueva muestra de polvo incrementando la temperatura en saltos de 50 K, hasta encontrar la temperatura mínima de autoinflamación, en caso de que la muestra se auto inflame a 500 °C, se repite el ensayo reduciendo la temperatura en saltos de 20 K, hasta que se encuentre la temperatura mínima de autoinflamación. Se considera que se ha producido una inflamación, cuando se aprecia una llamarada en el extremo inferior del tubo del horno. Es aceptable un tiempo de retardo en la inflamación pero las chispas sin llama no constituyen inflamación. La temperatura máxima a la que se realiza esta prueba es de 1000 °C y en caso de que la muestra no entre en combustión incluso a esta temperatura, se deja registrado.

Los resultados de este ensayo, demuestran que para que el polvo de alperujo que es arrastrado por la corriente de gases, entre en combustión debe alcanzar una temperatura de mínimo 640 °C cuando está en polvo y en el caso de depositarse en forma de capa una temperatura por encima de 400 °C.

## 6.4. Estudio de la posibilidad de inflamación del alperujo

La inflamación del alperujo podría producirse en el interior del trómel de secado si su temperatura igualara o llegara a ser mayor que la temperatura de inflamación (que es de 330 °C según los ensayos realizados) y si estuviera rodeada de un gas con contenido en oxígeno suficiente. Mientras la biomasa esté húmeda, la máxima temperatura que puede alcanzar sería la temperatura de bulbo húmedo, que en el peor de los casos sería de 63°C si los gases de escape de la turbina de gas no perdieran calor en las conducciones hasta el secadero, que para este día de pleno verano pudo alcanzar los 556 °C.

Para que el alperujo pudiera alcanzar esta temperatura de 330 °C, sería necesario que se seicara primero completamente. Esto eventualmente podría producirse en el caso de que el trómel, aún con carga de alperujo, dejara de girar y no se alimentara de alperujo húmedo por un largo periodo de tiempo

mientras los gases de escape de la turbina de gas siguieran pasando a través de él. En esta condición, mientras la biomasa superficial se terminara de secar se detectaría un paulatino aumento en la temperatura de los gases de escape a la salida del secadero hasta llegar a superar los 330 °C, porque al reducirse cada vez más la humedad de la biomasa, la cantidad de agua que se vaporizaría sería menor y por lo tanto los gases de escape perderían cada vez menos calor sensible, saliendo del secadero cada vez a mayor temperatura. Y en este momento se tendría que detectar un aumento brusco de temperatura dado por el inicio de la combustión de la biomasa dentro del trómel.

La otra posibilidad de inflamación es la ignición del polvo de alperujo. El polvo de alperujo, en condiciones normales de funcionamiento, es retenido en los filtros ciclónicos, pero eventualmente puede ser arrastrado por los gases hacia la chimenea, por taponamiento del ciclón. En esta condición, el riesgo de inflamación se presentaría si estos gases con la fracción fina del alperujo entraran en contacto con una fuente de ignición. Según los resultados anteriores, en esta condición, sería necesario que las partículas volantes entraran en contacto con aire caliente o con una superficie caliente a más de 640 °C, circunstancia que queda descartada porque la temperatura máxima de los gases de la turbina de gas dentro del secadero es de 556 °C, para condiciones críticas de temperatura ambiente cuando está en polvo. Sin embargo, si este polvo de alperujo se deposita formando una capa, se podría producir su inflamación si los gases calientes llegaran a las chimeneas a 400 °C, condición a la que no se puede llegar habida cuenta que los controles de funcionamiento de los sistemas de secado producen un corte de la operación si los gases de escape llegan a la chimenea a 125 °C.

## 7. Conclusiones y consideraciones finales

Los resultados del análisis termodinámico del proceso de secado de alperujo han permitido entender cómo se desarrolla el proceso de secado de la biomasa y predecir las temperaturas, composiciones y propiedades de los gases y del alperujo en un secadero.

De los resultados de los ensayos de ignición, de los cálculos termodinámicos se ha podido determinar que no existe posibilidad de inflamación y de combustión mantenida del alperujo en el proceso de secado en un secadero alimentado con gases de una turbina de gas.

## 8. Referencias

- [1] ALBURQUERQUE, J. A. y otros. *Agrochemical characterisation of "alperujo, a solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction*. *Bioresource Technology* 91 (2004), 195–200.
- [2] AMOS, W. A. *Report on Biomass Drying Technology*. *National Renewable Energy Laboratory*. NREL/TP-570-25885. Noviembre 1998.
- [3] GARCÍA-TORRENT, J y otros. *Determination of the risk of self-ignition of coals and biomass materials*. *Journal of Hazardous Materials* 213– 214 (2012), 230– 235.
- [4] PASCUAL LIZANAM, C. *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo*. Mº de Trabajo e Inmigración. Gobierno de España. 2008.
- [5] RAMIREZ, A. y otros. *Experimental determination of self-heating and self-ignition risks associated with the dusts of agricultural materials commonly stored in silos*. *Journal of Hazardous Materials* 175 (2010), 920–927.
- [6] GROTKJÆR, T. y otros. *An experimental study of biomass ignition*. *Fuel* 82 (2003) 825–833.
- [7] MIRANDA, T. y otros. *combustion analysis of different olive residues*. *International Journal of Molecular Sciences*. Abril 2008; 9(4), 512–525.