

# Determinación del riesgo de incendio en una instalación de secado de alperujo



## Determination of the risk of fire in an olive-oil mill waste dryer

Natalia Fonseca-González<sup>1</sup>, Jesús Casanova-Kindelán<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Minas y Energía. Departamento de Energía y Combustibles. c/ Ríos Rosas, 21 - 28003 Madrid. Tfno: +34 91 336 6469

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Industriales. Departamento de Ingeniería Energética. c/ José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid. Tfno: +34 91 336 30 23

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7936> | Recibido: 08/01/2016 • Aceptado: 21/03/2016

### ABSTRACT

• For the energy valorization of "alperujo", by-product of the olive oil two phases extraction process, it is necessary to perform a drying process to reduce moisture content from over 60 % to less than 10 % m/m w.b. In order to reduce primary energy consumption and get an economic return, usually in this kind of drying facilities Gas Turbine Cogeneration (GT-CHP) is used as a heat source.

In Spain, there have been recently some fires in this kind of GT-CHP facilities, which have caused big material losses.

Therefore, the aim of this study is to determine experimentally and analytically under which operational conditions could occur self-ignition of alperujo in the drying process, and determine the actual fire hazard in this type of GT-CHP system.

For analytical study, it was raised and validated a mathematical model to calculate the temperature and composition of the flue gases into and out of the dryer, depending on the technical characteristics of the GT, atmospheric conditions, and the flow and moisture content of the treated biomass. The model also calculates the wet bulb temperature, which sets the maximum temperature reached by the biomass during the drying process and determine the amount of biomass that can be completely dry depending on the flow and the conditions of inlet combustion gas. With these results and the minimum auto-ignition temperature of alperujo, experimentally determined according to EN 50281-2-1: 2000, it shows that there is no risk of ignition of alperujo under normal operating conditions in a rotary drying process.

• **Keywords:** Alperujo (olive-oil mill waste), drying of biomass, biomass auto-ignition, fire hazard, GT-CHP.

### RESUMEN

Para la valorización energética del alperujo, residuo del proceso de extracción en dos fases del aceite de oliva, es necesario realizar un proceso de secado para reducir su contenido de humedad de más del 60 % al 10 % m/m en b.h. Con el fin de reducir el consumo de energía primaria y obtener una rentabilidad económica, normalmente en este tipo de instalaciones de secado se usa la cogeneración con turbina de gas (TG) como fuente de calor.

En España en los últimos años han ocurrido algunos casos de incendio en este tipo de instalaciones de cogeneración, que han supuesto pérdidas materiales muy elevadas. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es determinar analítica y experimentalmente las condiciones operativas del secadero bajo las cuales podría comenzar un proceso de autoinflamación del alperujo y determinar el riesgo real de incendio en este tipo de instalaciones.

Para el estudio analítico, se ha planteado y validado el modelo matemático que permite calcular la temperatura y la composición de los gases de combustión a la entrada y a la salida del secadero, en función de las curvas características de la TG, de las condiciones atmosféricas, del caudal y del grado de humedad de la biomasa tratada. El modelo permite además calcular la temperatura de bulbo húmedo, que es la máxima temperatura que podría alcanzar la biomasa durante el proceso de secado y determinar la cantidad de biomasa que se puede secar completamente en función del caudal y de las condiciones de entrada de los gases de combustión.

Con estos resultados y la temperatura mínima de autoinflamación del alperujo determinada experimentalmente siguiendo la norma EN 50281-2-1:2000, se demuestra que en un proceso de secado de alperujo en condiciones normales de operación no existe riesgo de autoencendido que pueda dar origen a un incendio.

**Palabras clave:** alperujo, secado de biomasa, autoignición de biomasa, riesgo de incendio, cogeneración con turbina de gas

### 1. INTRODUCCIÓN

El alperujo es el residuo que se genera en las almazaras durante el proceso de extracción del aceite de oliva por centrifugación en dos fases [1]. Está básicamente formado por fragmentos de hueso, parte de la pulpa o mesocarpio y la piel, con importante contenido de agua y una pequeña parte de aceite residual. El alperujo muestra alto contenido en agua (entre un 60 % y un 75 % m/m en b.h.), pH ácido (5,4) y elevado contenido en materia orgánica (91 %) [1]. El alperujo genera serios problemas ambientales debido a su composición y grandes volúmenes de producción, por lo que la valorización de este residuo es de vital importancia. Una de las opciones más importantes para ello es su tratamiento para extraer la fracción de aceite aún presente en el alperujo, llamado aceite de orujo, y el uso del residuo, llamado orujillo, como combustible en calderas o quemadores [2]<sup>2</sup>. En todos los procesos de valorización es necesario realizar un proceso de secado<sup>3</sup> hasta una humedad de máximo 10 % m/m en b.h. [3].

El secado directo<sup>4</sup> por evaporación<sup>5</sup> es el más ampliamente utilizado con biomasa usando aire o gases calientes. En este proceso, la biomasa húmeda se somete a agitación mecánica que facilita la transferencia de calor y masa, mientras que el agua vaporizada es arrastrada por la corriente de gases [4]. El gas caliente se obtiene tradicionalmente por combustión en un quemador convencional, pero actualmente, con el impulso a la cogeneración, se aprovechan los gases emitidos en hornos, en motores de combustión in-

terna alternativos y más destacadamente en turbinas de gas (TGs). Así, el secado por cogeneración aumenta la eficiencia energética de la instalación, al tiempo que reduce las emisiones de contaminantes a la atmósfera, el consumo de energía primaria y los costos de operación, lo que hace que aumente la rentabilidad [5].

En cuanto al estudio del proceso de secado, Castaño et al. (2009) presentaron una metodología para la modelización por ecuaciones diferenciales de secaderos rotatorios isocorriente, con el fin de optimizar y hacer un control más preciso del proceso de secado de sólidos [6]. Golato et al. (2005) presentan una metodología para la determinación del coeficiente global de transferencia de calor de secaderos rotativos aplicado al secado de cáscara de limón, siendo este coeficiente uno de los parámetros más importantes para el diseño de la planta de secado [7]. Por su parte, Montero (2005) presentó un modelo matemático del proceso de secado de residuos biomásicos usando un secadero solar híbrido [2].

Específicamente, el proceso de secado del alperujo fue estudiado de forma experimental por Arjona et al. (1999), donde se determinaron a nivel de laboratorio las curvas de secado, la emisión de volátiles y las temperaturas de auto-ignición y degradación a alta temperatura bajo diferentes condiciones de operación [8]. Este estudio fue posteriormente la base para el desarrollo por el mismo autor de un sistema automático de control de un secadero convencional de alperujo alimentado directamente por los gases de un quemador [9]. Por su parte, más recientemente Gómez de la Cruz et al. (2015) presentaron un modelo en elementos finitos para la optimización del proceso de secado convencional de alperujo [10].

En España en los últimos años se han dado algunos casos de incendio en este tipo de instalaciones de cogeneración con TG, que han supuesto pérdidas materiales muy elevadas, y puesto que una de las averías más comunes en centrales con TGs es el incendio de los filtros de admisión de aire a la turbina [11], en uno de estos siniestros se planteó como hipótesis que el incendio se pudo originar por la salida de alperujo incandescente de la chimenea del sistema de secado, que al ser arrastrado por el viento pudo impactar en los filtros de aire de admisión de la turbina, causando el incendio de éstos y propagándose en el interior del sistema. Por esta razón, se planteó como objetivo de este trabajo determinar analítica y experimentalmente las condiciones operativas bajo las cuales puede comenzar un proceso de autoinflamación del alperujo dentro del proceso de secado y por lo tanto determinar el riesgo real de incendio por esta causa en este tipo de instalaciones.

En el estudio analítico, se ha planteado y validado el modelo matemático que permite calcular la temperatura y la composición de los gases de combustión a la entrada y a la salida del

secadero, en función de las curvas características de la TG, de las condiciones atmosféricas, del caudal y del grado de humedad de la biomasa tratada. El modelo permite calcular la temperatura de bulbo húmedo, que es la máxima temperatura que podría alcanzar la biomasa durante el proceso de secado y permite determinar la cantidad de biomasa que se puede secar completamente en función del caudal y de las condiciones de entrada de los gases de combustión. Por otro lado, de forma experimental, se han determinado bajo los procedimientos normalizados [12], las temperaturas de ignición en capa y de ignición en polvo del alperujo siguiendo la norma EN 50281-2-1:2000 [13]. Con estos resultados se establecen las condiciones operativas del proceso de secado de alperujo en las cuales hay riesgo real de incendio, resultados que pueden ser usados para la optimización, regulación automática y control de seguridad de estos sistemas de secado.

2. METODOLOGÍA

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Las plantas de cogeneración para el secado del alperujo con TG cuentan normalmente con:

- Balsas de almacenamiento de alperujo. Estas balsas se usan para acumular el alperujo según sale de las almazaras con una humedad superior al 70% m/m b.h. y permite eliminar parte de la humedad por evaporación natural.

- Grupo electrógeno. Para este tipo de plantas de cogeneración, donde la producción de energía térmica es el principal objetivo, se usan normalmente TGs, ya que la relación entre energía eléctrica y energía térmica producida es menor de 0,5. Para el caso de estudio, se ha considerado una turbina de gas Solar Turbines modelo Titan de 15 MW, trabajando en condiciones críticas en verano. En la Fig. 1, se muestran las curvas características de la turbina considerada para el estudio y las prestaciones a condiciones ISO.

- La planta de secado de alperujo estudiada incluye dos secaderos rotativos equicorriente<sup>6</sup>, llamados trómel [10], donde el producto y los gases se introducen por la parte delantera de forma que el gas a mayor temperatura está en contacto con el producto con mayor contenido de humedad (ver Fig. 2A). El alperujo proveniente de las balsas de almacenamiento, con una humedad >65 % m/m b.h., se mezcla antes de entrar a la línea de secado previo con alperujo semi-seco (20 % m/m b.h.) para reducir su humedad hasta 50 % m/m b.h. y así optimizar este proceso. El alperujo semiseco se envía a la línea de secado final,

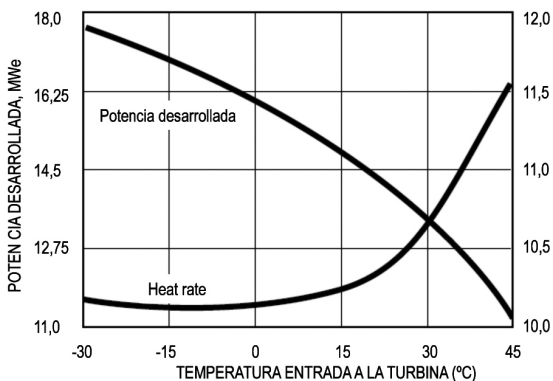


Fig. 1: Curvas características de la TG Solar Turbines modelo Titan 130

| Prestaciones nominales a condiciones ISO<br>(aire exterior a 15°C y 60% HR) |        |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|-------|
| Relación de compresión                                                      |        | 17    |
| Temperatura de combustión                                                   | °C     | 1300  |
| Consumo específico de calor (Heat Rate)                                     | MJ/kWh | 10,23 |
| Caudal de gases de escape                                                   | kg/s   | 49,8  |
| Temperatura gases de escape                                                 | °C     | 495   |

donde se termina el proceso de secado hasta un valor de humedad comprendido entre el 8 y el 10 % m/m b.h. [9].

A la salida de cada trómel, los gases de combustión 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 trómel y evitan la expulsión a la atmósfera del polvo de alperujo que por su reducida granulometría queda en suspensión y es arrastrado por la corriente de gases al atravesar el secadero (Fig. 2B).

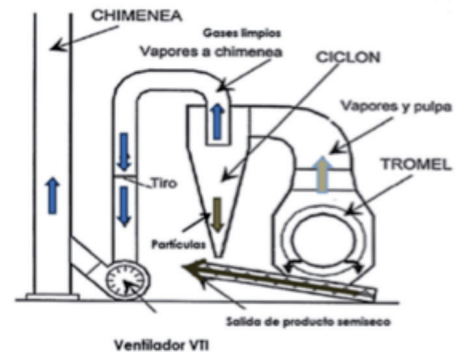
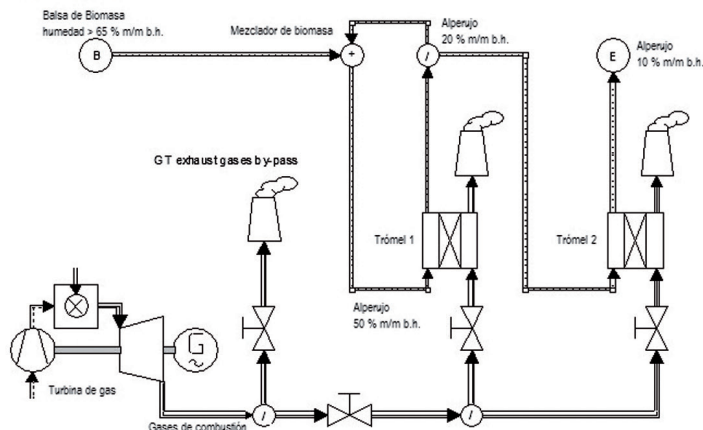


Fig. 2: A) Diagrama de flujo del secadero de alperujo y B) Representación del sistema de extracción de gases

## 2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SECADO

En el alperujo, una parte de la humedad está en forma líquida rodeando a las partículas sólidas formando una "sopa" de aspecto fluido, mientras que el resto está absorbida en el interior de las partículas, que son porosas y tienen diámetros equivalentes menores de 3 mm. Por ello, el proceso de secado implica la vaporización del agua libre, así como la extracción y vaporización del agua interior. Este proceso comienza cuando el agua libre superficial se vaporiza, transfiriendo el vapor a la corriente de gases y generando un mecanismo de transferencia de masa en el interior de las partículas que hace que progresivamente la humedad interior migre hacia la superficie y se mantenga el proceso de secado. Conforme el proceso de vaporización se va desarrollando, va aumentando el contenido de vapor de agua en los gases.

La biomasa húmeda, al entrar al secadero y ponerse en contacto con los gases calientes, aumenta su temperatura y empieza a vaporizar el agua. Esta evaporación provoca la saturación<sup>7</sup> en la atmósfera que está en contacto con la biomasa, llegándose

a reducir en esos puntos la temperatura hasta la temperatura de bulbo húmedo. Por este motivo, en condiciones de máxima transferencia de calor, la mayor temperatura que puede alcanzar la biomasa durante el proceso de secado es la temperatura de bulbo húmedo de los gases. Esta temperatura se mantiene prácticamente constante hasta que la biomasa pierde la humedad. Sin embargo, si tras el secado, la biomasa continúa en contacto con los gases calientes, empieza el sobrecalentamiento, aumentando su temperatura hasta alcanzar equilibrio térmico con la fuente de

calor o hasta que empiece el proceso de combustión al superar su temperatura de autoinflamación. De forma simplificada, en la Fig. 3 se observa cómo es la evolución de la temperatura de la biomasa conforme se desarrolla el proceso de secado. Gómez de la Cruz et al. (2015) [10] presentan las curvas de evolución de temperatura y humedad del alperujo a lo largo del trómel, así como la cinética del proceso de secado y el estudio de los diferentes modelos aplicables.

## 2.3. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Para la determinación del riesgo de incendio de una determinada biomasa es necesario conocer la mínima temperatura a la que se puede iniciar el proceso de inflamación. Este proceso se puede dar cuando la biomasa está depositada formando una capa o cuando se dispersa en forma de nube, por lo que, en este trabajo se determina la Temperatura Mínima de Inflamación en Capa (TMIC)<sup>8</sup> y la Temperatura Mínima de Inflamación en Nube (TMIN)<sup>9</sup> [14 y 15] siguiendo la norma EN 50281-2-1:2000 [13]. Las muestras para los ensayos se tomaron de una instalación real de secado de alperujo situada en el sur de España y los ensayos normalizados se realizaron en el Laboratorio Oficial Madariaga.

Se llevaron a cabo ensayos sobre dos muestras de alperujo: una de alperujo seco y otra muestra de polvo de alperujo retenido en los separadores ciclónicos (ver Fig. 2). En la Fig. 4 se muestra el aspecto de las dos muestras de alperujo ensayadas.

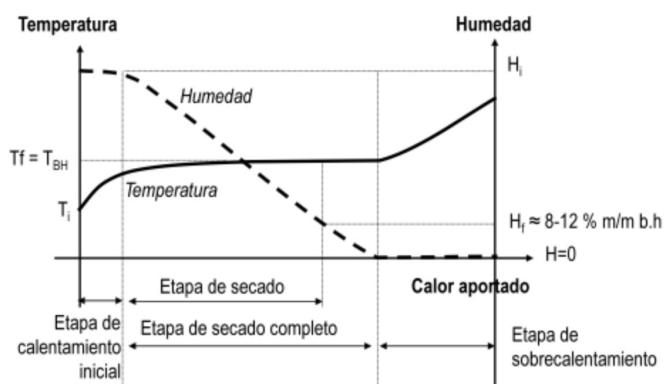


Fig. 3: Proceso de secado de biomasa. Evolución de la temperatura y humedad de la biomasa

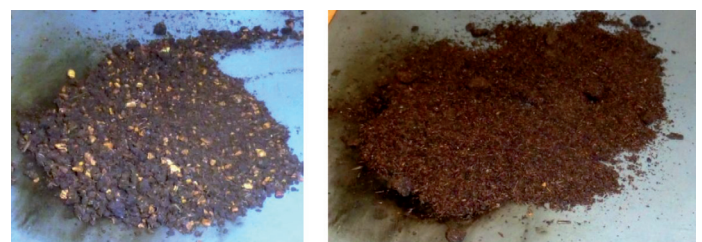


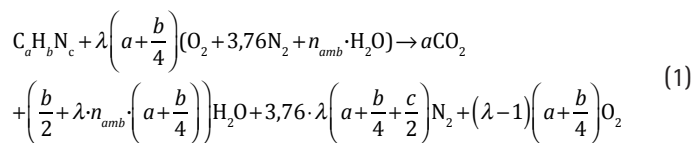
Fig. 4: Fotografías del alperujo. izq.: alperujo seco y dcha.: polvo de alperujo

La muestra de alperujo seco, tomado a la salida de la línea de secado final (ver Fig. 2A) con humedad del 8 % m/m b.h., color marrón oscuro y negro, de aspecto sucio y granulometría variable, se preparó con un secado de 72 horas en mufla a 70 °C (humedad final del 1,5 % m/m b.h.) y se sometió únicamente al ensayo TMLc porque la granulometría era excesiva para el ensayo de TMLn.

La muestra de polvo de alperujo, con una humedad del 7,9 % m/m b.h. y un tamaño medio de partícula de 665,4 µm, se extrajo del tornillo sin fin que retira el material retenido en los ciclones que están situados a la salida de los gases del secadero (Fig. 2B) y corresponde a la fracción de menor granulometría del alperujo. Esta muestra fue sometida a los ensayos para la determinación de la TMLc y la TMLn.

## 2.4. ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Para el estudio analítico del proceso de secado, lo primero es determinar la temperatura real de los gases de combustión a la salida de la TG, que depende de las condiciones atmosféricas, de la curva característica de la turbina (Fig. 1) y de la composición de los gases de escape, que se puede calcular conociendo la composición del gas natural y la relación aire- combustible (A/F) calculada considerando que esta relación es igual a la que tiene la TG trabajando en condiciones nominales ISO. La composición de los gases de escape se calcula utilizando la siguiente expresión generalizada de combustión con exceso de aire.



De esta forma, haciendo balance de energía en la TG, se determina el incremento de la entalpía de los gases a la salida de la TG, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

Rendimiento efectivo:

$$\eta_e = \frac{3600 [s/h]}{HR [kJ/kW \cdot h]} \quad (2)$$

Consumo de combustible:

$$\dot{m}_f [kg/s] = \frac{P_e [kW] \cdot HR [kJ/kW \cdot h] \cdot \rho [kg/Nm^3]}{LHV_{GN} [MJ/Nm^3]} \left( \frac{1MJ}{10^3 kJ} \right) \left( \frac{1h}{3600s} \right) \quad (3)$$

Caudal de gases de escape:

$$\dot{m}_{gh,i} = \dot{m}_f [kg/s] \cdot (A/F + 1) \quad (4)$$

Calor de los gases de escape:

$$Q_g = (1 - \eta_e - p_{TG}) \cdot \frac{\dot{m}_f [kg/s] \cdot LHV_{GN} [kJ/Nm^3]}{\rho_{GN} [kg/Nm^3]} \quad (5)$$

Incremento de entalpía gases:

$$\Delta h_{gh} = \frac{Q_g [kW]}{\dot{m}_{gh,i} [kg/s]} = h_{g,salida\_TG\_bh} - h_{g,temp\_ambiente\_bh} \quad (6)$$

Donde  $P_e$  es la potencia efectiva,  $\rho$  es la densidad del gas natural,  $LHV_{GN}$  es el poder calorífico del gas natural,  $\dot{m}_f$  es el consumo instantáneo de combustible,  $A/F$  es la relación aire combustible de la combustión y  $p_{TG}$  es el porcentaje de pérdidas por la envolvente de la TG.

Para la determinación de la entalpía de los gases de combustión, se han usado los valores de entalpía de las sustancias puras obtenidas con el programa Coolpack® a presión atmosférica (0,96

bar), cuyas funciones de regresión en función de la temperatura en grados centígrados (°C) para un rango de temperaturas entre 0 °C y 700 °C, se muestran en las ecuaciones siguientes:

Entalpía  $N_2$  en kJ/kg

$$h_{N_2}|_T = 0,00010 \cdot T^2 + 1,01384 \cdot T + 488,60773 \quad R^2 = 1,0000 \quad (7)$$

Entalpía  $O_2$  en kJ/kg

$$h_{O_2}|_T = 0,00013 \cdot T^2 + 0,91252 \cdot T + 521,38699 \quad R^2 = 1,0000 \quad (8)$$

Entalpía  $CO_2$  en kJ/kg

$$h_{CO_2}|_T = 0,00026 \cdot T^2 + 0,90190 \cdot T + 476,12724 \quad R^2 = 0,9999 \quad (9)$$

Entalpía  $H_2O_{vapor}$  en kJ/kg

$$h_{H_2O}|_T = -0,00009 \cdot T^2 + 2,03858 \cdot T + 2471,12047 \quad R^2 = 0,9999 \quad (10)$$

De esta forma, la entalpía de la mezcla de gases húmedos a temperatura  $T(^{\circ}C)$ , en base húmeda y en base seca, se calcula como se muestra en las siguientes ecuaciones:

Entalpía gases húmedos (base húmeda)

$$h_{gh,bh} \left( \frac{kJ}{kg_h} \right) \Big|_T = \frac{\sum_i m_i \cdot h_i|_T}{\sum_i m_i} \quad (11)$$

$$h_{gh,bh} \left( \frac{kJ}{kg_h} \right) \Big|_T = \frac{m_{N_2} \cdot h_{N_2}|_T + m_{O_2} \cdot h_{O_2}|_T + m_{CO_2} \cdot h_{CO_2}|_T + m_{H_2O} \cdot h_{H_2O}|_T}{m_{N_2} + m_{O_2} + m_{CO_2} + m_{H_2O}} \quad (12)$$

Entalpía gases húmedos (base seca)

$$h_{gh,bs} \left( \frac{kJ}{kg_h} \right) \Big|_T = \frac{m_{N_2} \cdot h_{N_2}|_T + m_{O_2} \cdot h_{O_2}|_T + m_{CO_2} \cdot h_{CO_2}|_T + m_{H_2O} \cdot h_{H_2O}|_T}{m_{N_2} + m_{O_2} + m_{CO_2}} \quad (13)$$

Donde la masa por mol de combustible ( $C_a H_b$ ), del componente  $i$  se calcula en función del número de moles del componente  $i$  en la eq. 1 y del peso molecular propio, como se muestra en la eq. 14.

$$m_i \left( \frac{kg_i}{mol_{C_a H_b}} \right) = \frac{n_i \cdot PM_i}{n_{C_a H_b}} \quad (14)$$

El segundo paso del cálculo analítico es la determinación de la temperatura de bulbo húmedo, que como se expuso anteriormente, es la máxima temperatura que puede alcanzar la biomasa durante este proceso. Para su determinación, se tienen en cuenta las condiciones termodinámicas de los gases a la entrada del secadero y se desprecian las pérdidas de calor. En el análisis no se tienen en cuenta la longitud del intercambiador ni el coeficiente de transferencia de calor, puesto que el objetivo del trabajo es determinar la máxima temperatura que pudiera llegar a tener la biomasa en contacto con los gases de combustión, situación que se presenta en el caso de considerar un intercambiador de longitud infinita en el que se alcance equilibrio térmico con un diferencial nulo de temperatura entre la biomasa y los gases ("pinch point") al final del proceso. Por lo tanto, las fórmulas empleadas para la determinación de la temperatura de bulbo húmedo son:

Humedad relativa (=100% completamente saturado)

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{SAT\_H_2O}|_T} \quad (15)$$

Presión de saturación del agua (en bares) a temperatura  $T(^{\circ}C)$

$$p_{SAT\_H_2O}|_T = e^{\frac{12,1299 - \left( \frac{4109,1}{T(^{\circ}C) + 237,65} \right)}{}} \quad \text{para } T < 373,85^{\circ}C = T_{critica\_H_2O} \quad (16)$$

Fracción molar  $\chi$  del vapor de agua en los gases de combustión a presión atmosférica, correspondientes a la presión de vapor  $p_v$  (bar):

$$\chi_{H_2O} = \frac{p_v}{P_{atm}} = \frac{n_{H_2O}}{n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O}} \quad (17)$$

y por lo tanto, en condiciones de saturación, el número máximo de moles de agua ( $n_{H_2O}$ ) a temperatura  $T$  en °C

$$n_{H_2O\_máx}|_T = \frac{\chi_{H_2O\_máx}|_T}{1 - \chi_{H_2O\_máx}|_T} \cdot (n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2}) \quad (18)$$

De esta forma, la temperatura de bulbo húmedo  $T_{BH}$  se determina (usando la eq. 13) teniendo en cuenta que la entalpía en base seca de los gases a la salida de la TG ( $T_{g\_i}$ ) es igual a la entalpía de los gases saturados de humedad a  $T_{BH}$  como se muestra en la siguiente igualdad:

$$h_{gh\_i,bs} \left( \frac{kJ}{kg_h} \right) \bigg|_{T_{g\_i}} = h_{gh\_sat,bs} \left( \frac{kJ}{kg_h} \right) \bigg|_{T_{BH}} \quad (19)$$

Donde:

$$h_{gh\_i,bs} \left( \frac{kJ}{kg_h} \right) \bigg|_{T_{g\_i}} = \frac{m_{N_2} \cdot h_{N_2}|_{T_{g\_i}} + m_{O_2} \cdot h_{O_2}|_{T_{g\_i}} + m_{CO_2} \cdot h_{CO_2}|_{T_{g\_i}} + m_{H_2O} \cdot h_{H_2O}|_{T_{g\_i}}}{m_{N_2} + m_{O_2} + m_{CO_2}} \quad (20)$$

$$h_{gh\_sat,bs} \left( \frac{kJ}{kg_h} \right) \bigg|_{T_{BH}} = \frac{m_{N_2} \cdot h_{N_2}|_{T_{BH}} + m_{O_2} \cdot h_{O_2}|_{T_{BH}} + m_{CO_2} \cdot h_{CO_2}|_{T_{BH}} + n_{H_2O\_máx}|_{T_{BH}} \cdot PM_{H_2O} \cdot h_{H_2O}|_{T_{BH}}}{m_{N_2} + m_{O_2} + m_{CO_2}} \quad (21)$$

El tercer paso del cálculo analítico es el balance de masa en el proceso de secado, para lo cual se han usado las siguientes fórmulas:

Humedad específica de la biomasa en base seca

$$H_{bs} = \frac{m_{H_2O} [kg_{H_2O}]}{m_{bs} [kg_s]} \quad (22)$$

Humedad específica de la biomasa en base húmeda

$$H_{bh} = \frac{m_{H_2O} [kg_{H_2O}]}{m_{bh} [kg_h]} = \frac{m_{H_2O} [kg_{H_2O}]}{m_{bs} [kg_s] + m_{H_2O} [kg_{H_2O}]} \quad (23)$$

Tasa de humedad eliminada en un proceso de secado, donde el contenido inicial de humedad en base húmeda es  $H_{i\_BH}$  y el contenido final de humedad en base húmeda es  $H_{f\_BH}$ :

$$\dot{m}_{H_2O\_evap} = \dot{m}_{i\_bh} \cdot \left[ H_{i\_bh} - \left( \frac{H_{f\_bh}}{1 - H_{f\_bh}} \right) \cdot (1 - H_{i\_bh}) \right] \quad (24)$$

Esta humedad pasa a los gases de combustión, y por lo tanto, el contenido de humedad adicional que se aporta por masa de gas de escape es igual a:

$$\frac{\dot{m}_{H_2O\_evap}}{\dot{m}_{gh\_i}} = \frac{\dot{m}_{H_2O\_evap}}{\dot{m}_{i\_bh}} \cdot \frac{\dot{m}_{i\_bh}}{\dot{m}_{gh\_i}} = \left[ H_{i\_bh} - \left( \frac{H_{f\_bh}}{1 - H_{f\_bh}} \right) \cdot (1 - H_{i\_bh}) \right] \cdot \frac{\dot{m}_{i\_bh}}{\dot{m}_{gh\_i}} \quad (25)$$

La masa de humedad adicional que se aporta al gas de combustión por mol de combustible (según la eq. 1), se calcula como se muestra en la eq. 26 y la masa de agua total que contienen los gases de combustión a la salida del proceso de secado se puede calcular con la eq. 27.

$$\frac{\dot{m}_{H_2O\_evap}}{n_f} = \frac{\dot{m}_{H_2O\_evap}}{\dot{m}_{gh\_i}} \cdot \left( 1 + \frac{A}{F} \right) \cdot PM_f \quad (26)$$

$$\frac{\dot{m}_{H_2O\_total}}{n_f} = \frac{\dot{m}_{H_2O\_evap} + \left( \frac{b}{2} + \lambda \cdot n_{amb} \cdot \left( a + \frac{b}{4} \right) \right) \cdot PM_{H_2O}}{n_f} \quad (27)$$

El cuarto paso es el balance de energía en el proceso de secado, donde se define el rendimiento del secadero como la relación del calor usado para el proceso de secado ( $\dot{Q}_{sec\_bms}$ ) y la variación de la energía térmica de los gases de combustión a su paso por el secadero, como se muestra en la eq. 28

$$\eta_{secadero} = \frac{\dot{Q}_{sec\_bms}}{\dot{m}_{gh\_i} \cdot (h_{gh\_i} - h_{gh\_f})} \quad (28)$$

Donde el calor usado en el proceso de secado por unidad de masa de biomasa entrante (en b.h.) es igual a:

$$\frac{\dot{Q}_{sec\_bms}}{\dot{m}_{i\_bh}} = \frac{\left( \dot{Q}_{cal\_bms\_sec\_T_{bms\_i}-T_{evap}} + \dot{Q}_{cal\_H_2O\_total\_T_{bms\_i}-T_{evap}} \right) + \dot{Q}_{evap\_H_2O} + \dot{Q}_{cal\_H_2O\_evap\_T_{evap}-T_{gh\_f}} + \dot{Q}_{cal\_bms\_sec\_T_{evap}-T_{gh\_f}}}{\dot{m}_{i\_bh}} \quad (29)$$

Y donde  $\dot{Q}_{cal\_bms\_sec\_T_{bms\_i}-T_{evap}}$  es el calor que se aporta a la fracción seca de la biomasa que entra al proceso desde la temperatura de entrada hasta la temperatura de evaporación, y se calcula en función de calor específico de la biomasa seca (0,848 kJ/kg °C), como se muestra en la eq. 30

$$\frac{\dot{Q}_{cal\_bms\_sec\_T_{bms\_i}-T_{evap}}}{\dot{m}_{i\_bh}} = (1 - H_{i\_bh}) \cdot c_{p\_bms\_sec} \cdot (T_{evap} - T_{bms\_i}) \quad (30)$$

Teniendo en cuenta que la máxima temperatura de entrada de la biomasa al secadero es igual a la temperatura de bulbo húmedo correspondiente a las condiciones atmosféricas, se puede calcular de igual forma que se calculó la temperatura de evaporación usando las ecuaciones eq. 15 a eq. 21.

El calor de calentamiento del agua líquida contenida en la biomasa que entra al proceso ( $\dot{Q}_{cal\_H_2O\_total\_T_{bms\_i}-T_{evap}}$ ) desde la temperatura de entrada hasta la temperatura de evaporación, es función del calor específico del agua líquida (4,1868 kJ/kg°C) y se calcula como se muestra en la eq. 31.

$$\frac{\dot{Q}_{cal\_H_2O\_total\_T_{bms\_i}-T_{evap}}}{\dot{m}_{i\_bh}} = H_{i\_bh} \cdot c_{p\_H_2O\_liq} \cdot (T_{evap} - T_{bms\_i}) \quad (31)$$

El calor aportado para la evaporación del agua ( $\dot{Q}_{evap\_H_2O}$ ) se calcula en función del calor latente de vaporización  $\lambda$  a temperatura  $T$  en °C y del contenido inicial y final de humedad en la biomasa, como se muestra en la eq. 32

$$\frac{\dot{Q}_{evap\_H_2O}}{\dot{m}_{i\_bh}} = \frac{\dot{m}_{H_2O\_evap} \cdot \lambda|_{T_{evap}}}{\dot{m}_{i\_bh}} = \left[ H_{i\_bh} - \left( \frac{H_{f\_bh}}{1 - H_{f\_bh}} \right) \cdot (1 - H_{i\_bh}) \right] \cdot \lambda|_{T_{evap}} \quad (32)$$

Donde el calor latente de vaporización  $\lambda$  a temperatura  $T$  en °C se puede calcular usando una regresión polinómica de valores extraídos del programa Coolpack®, que se muestra en la eq. 33

$$\lambda_{H_2O}|_T = -0,00006 \cdot T^3 + 0,01984 \cdot T^2 - 4,52713 \cdot T + 2.550,844 \quad R^2 = 0,99547 \quad (33)$$

Por otro lado,  $\dot{Q}_{cal_{H_2O_{-}T_{evap}-T_{gh,f}}}$  es el calor de calentamiento que hay que aportar al agua evaporada desde la temperatura de evaporación hasta la temperatura de salida de los gases de combustión, que se calcula a partir del calor específico del vapor (1,86 kJ/kg°C), como se muestra en la eq. 34 y en la eq. 35.

$$\dot{Q}_{cal_{H_2O_{-}T_{evap}-T_{gh,f}}} = \dot{m}_{H_2O_{-}evap} \cdot c_{p_{H_2O_{-}vap}} \cdot (T_{gh,f} - T_{evap}) \quad (34)$$

$$\frac{\dot{Q}_{cal_{H_2O_{-}T_{evap}-T_{gh,f}}}}{\dot{m}_{i,bh}} = \left[ H_{i,bh} - \left( \frac{H_{f,bh}}{1 - H_{f,bh}} \right) (1 - H_{i,bh}) \right] \cdot c_{p_{H_2O_{-}vap}} \cdot (T_{gh,f} - T_{evap}) \quad (35)$$

Y el calor para el sobrecalentamiento de la biomasa ( $\dot{Q}_{cal_{bms_{-}sec_{-}T_{evap}-T_{gh,f}}}$ ), que se transfiere sólo en el caso de que la biomasa se seque completamente y el proceso tenga suficiente tiempo para que se alcance un equilibrio de temperatura con el gas de escape, se calcula como se muestra en la eq. 36.

$$\frac{\dot{Q}_{cal_{bms_{-}sec_{-}T_{evap}-T_{gh,f}}}}{\dot{m}_{i,bh}} = (1 - H_{i,bh}) \cdot c_{p_{bms_{-}sec}} \cdot (T_{gh,f} - T_{evap}) \quad (36)$$

De todo el análisis anterior se puede calcular, por un lado, la temperatura de los gases de combustión a la salida del secadero, conociendo el caudal de biomasa entrante, su contenido de humedad inicial y final, así como el caudal de gases de combustión y su temperatura inicial, resolviendo la siguiente ecuación:

$$h_{gh,f} = h_{gh,i} - \frac{\dot{Q}_{sec_{bms}}}{\eta_{secadero} \cdot \dot{m}_{gh,i}} \quad (37)$$

Por otro lado, se puede calcular el caudal de biomasa que se puede secar por unidad de caudal másico de gases de escape, conociendo el contenido de humedad inicial y final de la biomasa y la temperatura de entrada de los gases de combustión al secadero, resolviendo la ecuación para diferentes temperaturas de salida de los gases de combustión del secadero:

$$\frac{\dot{m}_{i,bh}}{\dot{m}_{gh,i}} = \frac{\eta_{secadero} \cdot (h_{gh,i} - h_{gh,f}) \cdot \dot{m}_{i,bh}}{\left( \dot{Q}_{cal_{bms_{-}sec_{-}T_{bms,i}-T_{evap}}} + \dot{Q}_{cal_{H_2O_{-}total_{-}T_{bms,i}-T_{evap}}} + \dot{Q}_{evap_{H_2O}} + \dot{Q}_{cal_{H_2O_{-}evap_{-}T_{evap}-T_{gh,f}}} + \dot{Q}_{cal_{bms_{-}sec_{-}T_{evap}-T_{gh,f}}} \right)} \quad (38)$$

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los resultados del ensayo del ensayo de TMIc, según la norma EN 50281-2-1:2000 [13], con la muestra de alperujo seco, demuestran que, para que el alperujo en la granulometría normal entre en combustión, debe alcanzar una temperatura mínima de 330 °C. Este resultado es algo más reducido que el presentado por Arjona et al. [8]

Los resultados de los ensayos con la muestra de alperujo obtenido de los ciclones demuestran que, para que el polvo de alperujo entre en combustión, debe alcanzar una temperatura mínima de 640 °C para inflamación en nube y mayor a 400 °C para inflamación en capa.

#### 3.2. ANÁLISIS TERMODINÁMICO

*Temperatura real de los gases de combustión a la salida de la TG:*

- Gas Natural usado: 94,1 % de CH<sub>4</sub>, 5 % C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 0,2 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y 0,5 % N<sub>2</sub>, peso molecular 16,76 g/mol, densidad 0,78 kg/Nm<sup>3</sup>, poder calorífico inferior (LHV) 35 MJ/Nm<sup>3</sup> y composición elemental: C<sub>1,055</sub> H<sub>4,1</sub> N<sub>0,010</sub>.
- Para condiciones ISO (Temperatura ambiente 15 °C y 60 % HR) (ver apartado 2.1) usando las eq. 1 a eq. 18, la pérdida de calor en la envolvente de la TG es igual a 5,6 % y la relación aire-combustible usada a plena carga es de 56,3 (λ=3,28).
- Para las condiciones ambientales críticas de estudio que son las correspondientes a un día caluroso de verano con temperatura 37 °C, humedad relativa 13 % y presión barométrica 0,9757 bar:
  - La composición del aire (eq. 1), usando las eq. 15 a la eq. 18, es O<sub>2</sub> + 3,76N<sub>2</sub> + 0,04 H<sub>2</sub>O.
  - La TG tiene una producción a plena carga de 12,45 MWe y un consumo específico de calor (Heat Rate – HR) de 11,1 MJ/kWh (ver Fig. 1). Para estas condiciones de trabajo, se considera que la relación aire/combustible y las pérdidas de calor en la turbina son iguales a las determinadas para las condiciones ISO.
  - La composición de los gases de combustión a la salida de la turbina, calculada usando la eq. 1, es (v/v): 76,0 % N<sub>2</sub>; 3,1 % CO<sub>2</sub>; 14,0 % O<sub>2</sub> y 6,9 % de H<sub>2</sub>O. Peso molecular 28,37 g/mol.
  - Los parámetros de funcionamiento de la TG usando las eq. 2 a la eq. 6, son: Rendimiento efectivo: 32,4%; Consumo de combustible: 0,78 kg/s; Caudal de gases de escape: 0,78 kg/s; Calor de los gases de escape: 25,9 MW; Incremento de entalpía gases: 578,4 kJ/kg.
  - La temperatura de los gases a la entrada de los gases al secadero (igual a la temperatura a la salida de la TG sin tener en cuenta las pérdidas de calor), usando las eq. 7 a eq. 14, es igual a 534,9 °C (808 K y h<sub>gh,i,bh</sub> = 1164,3 kJ/kg).

*Temperatura de bulbo húmedo (temperatura de evaporación):*

- La temperatura de bulbo húmedo, correspondiente a la entalpía en base seca de los gases a la entrada del secadero (a 534,9 °C h<sub>gh,i,bs</sub> = 1217,6 kJ/kg) y usando las eq. 15 a la eq. 21, es de 67,7 °C. Esta temperatura es la máxima que alcanza la biomasa durante el proceso de secado. De forma general, en la Fig. 5 se muestra para cada valor de entalpía en base seca, la temperatura de los gases de combustión y la temperatura de bulbo húmedo que corresponde y de forma particular se muestra el caso actual. De datos experimentales, con temperaturas de los gases de combustión a la entrada del secadero de 430 °C, se comprueba que la temperatura de salida de la biomasa está entre 40 y 50 °C, lo cual confirma los resultados mostrados en la Fig. 5, en la que no se tiene en cuenta ninguna pérdida térmica.

*Balance de masa y energía en el proceso de secado:*

- La temperatura de entrada del alperujo al proceso de secado, como se mencionó anteriormente, alcanza como máximo la temperatura de bulbo húmedo correspondiente a las condiciones atmosféricas consideradas (temperatura ambiente 37 °C y 13 % HR). Usando las eq. 13 a eq. 19, se determina que es igual a 17,5 °C.

- El rendimiento real del secadero (eq. 28) es del 95 %, calculado usando los siguientes datos reales de producción de la planta de secado: caudal diario de biomasa tratado en b.h.: 710275 kg/día con 76,5 % m/m b.h. de humedad inicial y 8,34 % m/m b.h. de humedad final con temperatura real de entrada de los gases al secadero de 431 °C y temperatura de salida de los gases del secadero 88,7 °C.
- La máxima cantidad de alperujo (con diferentes grados de humedad inicial) que se puede secar completamente y llegar al sobrecalentamiento (Fig. 3) en relación al caudal másico de los gases de combustión para la condición crítica de funcionamiento estudiada, usando las eq. 24 a eq. 38 y teniendo en cuenta transferencia de calor completa, se muestra en la Fig. 6. En esta figura se señala la zona de riesgo de incendio, que según los resultados experimentales se presenta cuando la biomasa sólida alcanza los 330 °C.

### 3.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Según los resultados experimentales, la condición crítica de inflamación del alperujo en un secadero equicorriente se presenta cuando la biomasa alcanza los 330 °C, situación que se puede presentar en las condiciones operativas que se muestran en la Fig. 6, en donde la temperatura de los gases de combustión a la salida del secadero supera dicha temperatura. Sin embargo, como se vio anteriormente, mientras la biomasa esté

húmeda, la máxima temperatura que puede alcanzar será la temperatura de bulbo húmedo, que en el caso más desfavorable es de 68 °C.

Para el sistema de secado de la Fig. 2 y para las condiciones críticas de estudio, como se observa en la Fig. 6, el riesgo de incendio en el trómel de secado secundario se presenta para caudales másicos de alperujo (con 20 % de humedad en b.h.) menores de 0,27 kg/s por kg/s de gases de combustión y en el trómel de secado primario, para caudales másicos de alperujo (con 65 % de humedad en b.h.) menores de 0,11 kg/s por kg/s de gases de combustión. Estas situaciones eventualmente podrían llegar a presentarse si la alimentación al trómel se tapona parcial o totalmente y la alimentación de gases de combustión continúa sin variación. En estas condiciones, se detectaría un paulatino aumento en la temperatura de los gases de escape a la salida del secadero (que en condiciones normales de funcionamiento es menor de 90 °C) hasta llegar a superar los 330 °C.

Es importante tener en cuenta que, en condiciones normales de funcionamiento, los sistemas de protección de los secaderos producen alarma cuando la temperatura de los gases de combustión a la salida de los mismos supera los 90 °C y se acciona el sistema contra incendios de la instalación cuando esta temperatura supera los 125 °C, por lo que en condiciones normales de funcionamiento, donde no se ha llegado a accionar las alarmas acústicas ni el sistema contra incendios, se puede asegurar que el alperujo no ha podido llegar a condiciones de auto inflamación (330 °C) y por lo tanto, en condiciones normales de funcionamiento no hay riesgo de incendio de la biomasa dentro del trómel.

Según los resultados experimentales, en un sistema de secado de alperujo no se puede llegar a condiciones de inflamación en nube del polvo de alperujo, puesto que sería necesario que las partículas volantes entraran en contacto con aire caliente o con una superficie caliente a más de 640 °C, circunstancia que es descartable porque la temperatura máxima de los gases de la TG dentro del secadero es de 535 °C. 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 nunca se llega en condiciones normales de operación, como anteriormente se indicó.

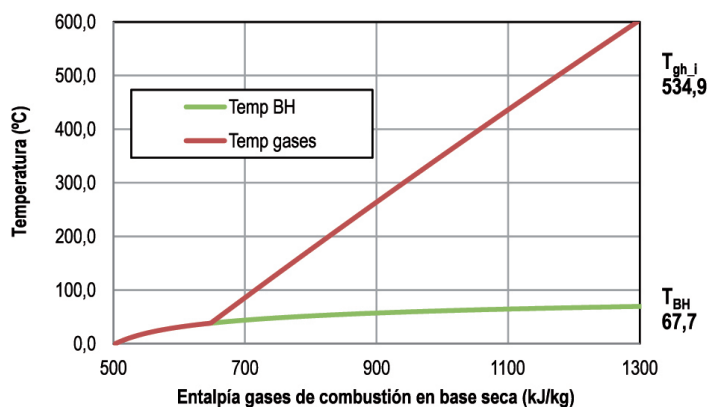


Fig. 5: Temperatura de gases a la salida de la TG y temperatura de bulbo húmedo

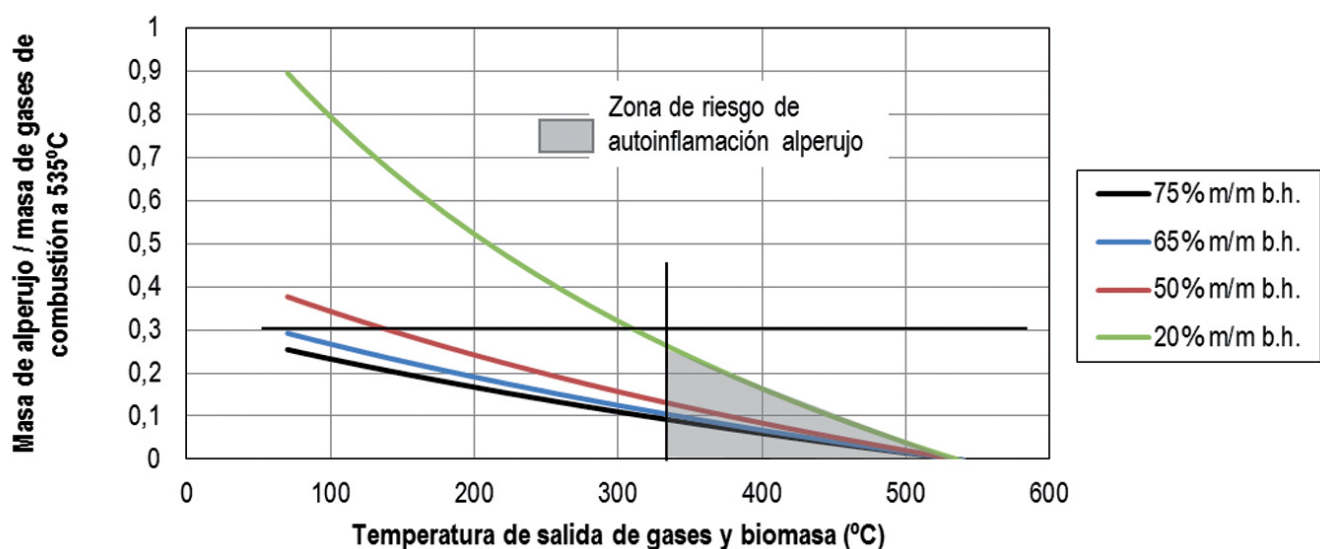


Fig. 6: Máxima cantidad de alperujo (kg/s) que puede llegar al sobrecalentamiento por unidad de flujo másico de gases de combustión de la turbina de gas a 535°C.

## 4. CONCLUSIONES

La mínima temperatura a la que el alperujo entra en combustión es de 330 °C, temperatura que según el análisis termodinámico no se alcanza en el proceso de secado alimentado con gases de una TG en condiciones normales de funcionamiento. Sin embargo, hay riesgo de incendio si la alimentación a cualquiera de los trómeles se llegase a parar completa o parcialmente y se continuara con la alimentación de gases de la turbina, de tal forma que la temperatura de los gases de combustión a la salida del proceso de secado empezaría a subir, pudiendo llegar a la temperatura mínima de inflamación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Albuquerque J. (2004). "Agrochemical characterisation of "alperujo", a solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction". *Bioresource Technology*, 2004 Vol 91(2), p.195-200. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00177-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00177-9)
- [2] Montero I. "Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos". Tesis doctoral Universidad de Extremadura 2005:p.1-286.
- [3] Miranda T, Esteban A, Rojas S, et al. "Combustion analysis of different olive residues". *International Journal of Molecular Sciences*, 2008. Vol 9(4), p.512-525. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ijms9040512>.
- [4] Amos W. "Report on biomass drying technology". November 1998. Retrieved from <http://infohouse.p2ric.org/ref/22/21209.pdf>
- [5] Wahlund B, Yan J, Westermarck M. "A total energy system of fuel upgrading by drying biomass feedstock for cogeneration: a case study of Skellefteå bioenergy combine". *Biomass and Bioenergy* 2002 Vol.23 p.271-81. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00055-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00055-7).
- [6] Castaño F, Rubio FR, Ortega MG. "Modelado de Secaderos Rotatorios en Isocorriente". *Rev Iberoam Autom E Inform Industrial* 2009 Vol. 6 p. 32-43. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1697-7912\(09\)70106-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70106-2).
- [7] Golato MA, Ruiz H, D'Angelo JF, et al. "Determinación del coeficiente global de transferencia de calor en secaderos rotativos de cáscara de limón". *Rev Ind Y Agrícola Tucumán* 2005. Vol 82. p.27-35.
- [8] Arjona R, García A, Ollero P. "Drying of alperujo, a waste product of the olive oil mill industry". *Journal of Food Engineering*, 1999 Vol. 41(3), p. 229-234. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00104-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00104-1)
- [9] Arjona R, Ollero P, Vidal FB. "Automation of an olive waste industrial rotary dryer". *Journal of Food Engineering*, 2005. Vol 68(2), p. 239-247. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.049>
- [10] Gómez-de la Cruz FJ, Casanova-Peláez PJ, Palomar-Carnicero JM, et al. "Modeling of olive-oil mill waste rotary dryers: Green energy recovery systems". *Applied Thermal Engineering*, 2015 Vol 80, p-362-373. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.035>
- [11] Huertos D. "Mantenimiento predictivo de turbinas de gas". 2011. PRC Universidad Carlos III.
- [12] Ramírez Á, García-Torrent J, Tascón A. "Experimental determination of self-heating and self-ignition risks associated with the dusts of agricultural materials commonly stored in silos". *Journal of Hazardous Materials*, 2010 Vol. 175(1-3), p.920-927. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.096>.
- [13] Ramírez Á, García-Torrent J, & Aguado PJ. "Determination of parameters used to prevent ignition of stored materials and to protect against explosions in food industries". *Journal of Hazardous Materials*, 2009 Vol. 168(1), p.115-120. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.013>
- [14] García-Torrent J, Ramírez-Gómez A, Querol-Aragón E, et al. "Determination of the risk of self-ignition of coals and biomass materials". *Journal of Hazardous Materials*, 2012. Vol 213-214, p.230-235. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.086>.
- [15] Lizanam P. "Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo". B. N. 145 de 18 de junio de 2003, Ed. Ministerio de Trabajo. España.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Oleícola El Tejar por los datos reales de funcionamiento suministrados.

## (ENDNOTES)

- 1 La materia orgánica del alperujo es principalmente de naturaleza lignica (35%), hemicelulosa y celulosa. Además, el alperujo presenta un elevado contenido de grasa (entre un 10% y un 12%) y también de polifenoles hidrosolubles (0.9%), fracciones que le otorgan propiedades fitotóxicas.
- 2 El orujillo, debido a su composición, tiene un elevado contenido energético con un poder calorífico inferior de aproximadamente 20 MJ/kg, en base seca [3].
- 3 El proceso de secado de materiales con alto contenido en agua, como la biomasa o los materiales cerámicos, puede hacerse mediante sistemas mecánicos, físico-químicos o por evaporación. Estos sistemas de secado se pueden clasificar de forma general según la propagación de calor, la presión de trabajo, el agente desecante, la disposición de las corrientes, el tiempo de residencia, etc.
- 4 De acuerdo a la forma como el calor se aporta al proceso de secado, éste se puede clasificar en secado directo y secado indirecto. En el secado directo, el material recibe calor por contacto directo con el fluido caloportador (aire, gases calientes o vapor a alta temperatura), mientras que en el secado indirecto el material se separa del fluido caloportador por medio de un intercambiador de calor.
- 5 El secado por evaporación consiste en aportar la energía térmica correspondiente al calor latente de vaporización del agua para provocar su evaporación a presión atmosférica.
- 6 Los secaderos comúnmente utilizados son de tipo rotativo y pueden trabajar en equicorriente o contracorriente. En los sistemas en equicorriente la biomasa y el aire caliente fluyen en el mismo sentido, entrando en contacto los gases calientes a mayor temperatura con los productos más húmedos, disminuyendo la pérdida de volátiles y el riesgo de incendio. El sistema a contracorriente tiene la ventaja de conseguir mayores reducciones de humedad en el producto, ya que los sólidos más secos entran en contacto con los gases más calientes, pero tienen el inconveniente de aumentar el riesgo de incendio [4].
- 7 Cuando el aire o una mezcla de gases está saturado/a de vapor de agua, la presión parcial del vapor es igual a la presión de saturación del agua, la cual depende de la temperatura.
- 8 El ensayo de Mínima Temperatura de Inflamación en capa (MTIc) se realiza conforme a la norma EN 50281-2-1:2000 [13]. Se utiliza 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 varias pruebas, finaliza 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 detecte 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.
- 9 El ensayo de Mínima Temperatura de Inflamación en nube (MTIn) se lleva a cabo según la norma EN 50281-2-1:2000 [13]. Este ensayo se realiza dispersando una muestra de 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 intervalos de 50 K, hasta encontrar la temperatura mínima de autoinflamación. En caso de que la muestra se autoinflame a 500 °C, se repite el ensayo reduciendo la temperatura en intervalos 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, este hecho se deja registrado.