



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR  
D'ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL  
MEDI NATURAL

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



## ***DIMENSIONAMIENTO DE QUEMADORES EN OPERACIONES DE SECADO UTILIZANDO ENERGÍAS ALTERNATIVAS SOSTENIBLES CON EL MEDIOAMBIENTE***

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO RURAL

ALUMNO: Juan Ángel Tomás Egea

TUTOR: Dr. Pedro José Fito Suñer

DIR. EXPERIMENTAL: Dra. Marta Castro Giráldez

07 de Julio de 2016, Valencia



**Nombres y apellidos:** Juan Ángel Tomás Egea

**Título del TFG:** Dimensionamiento de quemadores en operaciones de secado utilizando energías alternativas sostenibles con el medioambiente

**Lugar de realización:** Instituto Universitario de Ingeniería de los Alimentos para el Desarrollo (IuIAD-UPV).

**Titulación:** Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural.

**Orientación del grado:** Industrias Agrarias y Alimentarias.

**Tutor:** Dr. Pedro José Fito Suñer.

**Directora experimental:** Dra. Marta Castro Giráldez.

**Fecha lectura:** Julio 2015



## Resumen

Una de las operaciones unitarias más importantes en la industria alimentaria es la operación de secado. Esta operación representa una proporción muy elevada en los costes variables de las plantas industriales por el elevado gasto de la operación de acondicionamiento del aire. La operación de acondicionamiento del aire más común en la industria alimentaria es el calentamiento del aire mediante un sistema de combustión, dicha operación se denomina quemador.

El objeto del siguiente proyecto es el estudio de los secadores, sus eficiencias y posibles formas de mejorarlos. Con este fin, el presente trabajo se estructura en los siguientes apartados; quemadores de los secadores de combustión, donde se compararán distintos combustibles para los quemadores. Dentro de los combustibles se valorarán tanto los derivados del petróleo, como posibles residuos sustitutos. Se seleccionarán una serie de residuos lignocelulósicos desarrollando un sistema de medida del proceso de combustión mediante técnicas espectrométricas de infrarrojos. Para realizar esta comparación se sistematizará el dimensionamiento de cualquier quemador. Una vez dimensionado se compararán costes, impacto medioambiental y fiabilidad del combustible. En segundo lugar, se analizarán los secadores que no usan combustión; entre los que se encuentran los secadores por depresión de la humedad absoluta (mediante equipos de frío) y por calentamiento eléctrico, donde se analizará el coste, determinándose opciones para mejorar la viabilidad económica.

De esta manera se buscará la viabilidad tecnológica y económica de nuevos sistemas de acondicionamiento de aire en las operaciones de secado de alimentos como alternativa a los quemadores que usan combustibles fósiles.

**Palabras clave:** secador, quemador, combustible fósil, combustible, efecto invernadero, energía renovable, cambio climático, secadores alternativos, secadores medioambientales, secadores para países en desarrollo.



## Abstract

One of the most important unit operations in the food industry is the drying operation. This operation represents a high proportion of variable costs of industrial plants by the high cost of the operation of an air conditioning. The most common operation for air conditioning is the heating of the air by a combustion system, this operation is called burner.

The purpose of this project is the study of the dryers, efficiencies and ways to improve them. This project is divided into the following sections; Comparison of different fuels for burners of combustion dryers. Inside fuels, an assessment of the petroleum products and wastes as potential substitutes. Some vegetable waste will be described throughout the combustion process by using a spectrometric infrared technique. To make this comparison the design of any burner will be systematized. Once dimensioned, costs, environmental impact and fuel reliability are compared. In second place, the dryers that do not use combustion will be analyzed; dryers depression of absolute humidity (by cooling equipment) and electrical heating, where the cost will be discussed, determining options for improving economic viability. Thirdly, the study of the renewable energy as a response to the environmental needs of the planet and the national, European and international initiatives to reduce greenhouse gases. In this way, the technological and economic viability of new air conditioning systems in the food drying operations as an alternative to use fossil fuel burners will be studied and compared.

**Keywords:** dryers, burner, fossil fuel, fuel, renewable energy, greenhouse effect, climate change, alternative dryers, environmental dryers, dryers for underdeveloped countries.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. SECADORES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3.1. FUNDAMENTOS DEL SECADO CON AIRE CALIENTE.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3.2. TERMODINÁMICA DEL AIRE HÚMEDO.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.3. FUNCIONAMIENTO DE UN QUEMADOR: ACOPLAMIENTO A UN SECADOR.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4.1. PROBLEMÁTICA DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> DE CICLO LARGO Y LA HUELLA DE CARBONO.....</b>	<b>8</b>
<b>1.5. COMBUSTIBLES PARA LA ALIMENTACIÓN DEL QUEMADOR.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5.1. COMBUSTIBLES CLÁSICOS O FÓSILES.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5.2. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.....</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 PLAN DE TRABAJO.....</b>	<b>13</b>
<b>3. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1. MATERIAS PRIMAS.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2. PROTOCOLO DE TOMA DE MUESTRA.....</b>	<b>14</b>
<b>3.3. MEDIDAS DE INFRARROJOS.....</b>	<b>16</b>
<b>3.4. SECADO DE LA MUESTRA.....</b>	<b>16</b>
<b>3.5 MEDIDA DE LA MASA DE LA MUESTRA.....</b>	<b>17</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1. CÁLCULO DE TEMPERATURA DE LLAMA Y FRACCIÓN MÁSCICA DE CENIZAS.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1. DIMENSIONADO DEL QUEMADOR .....</b>	<b>22</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>32</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>33</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>35</b>

## **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.1</b> Parámetros empíricos de una ecuación polinómica de grado 4, que permite predecir el calor específico de las especies químicas que conforman el aire.....	7
<b>Tabla 1.2</b> Parámetros empíricos de una ecuación polinómica de grado 5, que permite predecir el calor latente de vaporización del agua.....	7
<b>Tabla 4.1</b> Valores de emisividad de los residuos lignocelulósicos a distintas temperaturas.....	19
<b>Tabla 4.2</b> Tabla de fracciones másicas de ceniza obtenida con los datos del experimental.....	22
<b>Tabla 4.3</b> Tabla con la fórmula química, reacción de combustión, masa molecular, calor específico, calor latente de combustión y temperatura de llama.....	24
<b>Tabla 4.4</b> Tabla composicional con las relaciones entre los 3 carbohidratos combustionables de distintas variedades de cáscara de arroz.....	24
<b>Tabla 4.5</b> Resultado del modelo de sistematización del dimensionamiento de quemadores.....	27

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución de la degradación de los alimentos con distintas actividades del agua.....	2
Figura 1.2. Izquierda: Calor latente de vaporización en azul y presión parcial de saturación en rojo. Derecha: Calor específico del aire en azul y calor específico del agua en forma de vapor en rojo.....	5
Figura 1.3. Ejemplo de diagrama de Mollier.....	6
Figura 1.4. Esquema de quemador acoplado al mezclador de aire.....	8
Figura 3.1. Montaje del experimental.....	15
Figura 3.2. Estufa a vacío P. SELECTA mod. VACIOTEM.....	16
Figura 3.3. Balanza usada para medir la masa de las muestras.....	17
Figura 4.1. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de la muestra 1 de cascarilla de arroz.....	18
Figura 4.2. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de las cinco muestras de cascarilla de arroz.....	20
Figura 4.3. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de la muestra 2 de cáscara de nuez. ....	20
Figura 4.4. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de las cinco muestras de cáscara de nuez.....	21
Figura 4.5. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de las cinco muestras de cáscara de nuez.....	21
Figura 4.6 Tabla con la fórmula química, reacción de combustión, masa molecular, calor específico, poder calorífico y temperatura de llama .....	22
Figura 4.7. Esquema de un quemador.....	23
Figura 4.8 Diagrama de iteración para el cálculo del caudal de combustible de entrada al quemador.....	26
Figura 4.9. Representación del proceso de combustión y mezcla de una corriente de aire desde 25 °C de condiciones ambientales, para llegar a una temperatura de 200 °C, mediante la combustión de cáscara de arroz, mostrando el mismo proceso pero sin combustión y con el calentamiento eléctrico (sin humidificación).....	28
Figura 4.10. Representación del proceso de combustión y mezcla de una corriente de aire desde 25 °C de condiciones ambientales, para llegar a una temperatura de 200 °C, mediante la combustión de cáscara de nuez, mostrando el mismo proceso pero sin combustión y con el calentamiento eléctrico (sin humidificación).....	29
Figura 4.11. Representación del proceso de combustión y mezcla de una corriente de aire desde 25 °C de condiciones ambientales, para llegar a una temperatura de 200 °C, mediante la combustión de gas natural, mostrando el mismo proceso pero sin combustión y con el calentamiento eléctrico (sin humidificación).....	30

Figura 4.12. Representación del proceso de combustión y mezcla de una corriente de aire desde 25 °C de condiciones ambientales, para llegar a una temperatura de 200 °C, mediante la combustión de diésel, mostrando el mismo proceso pero sin combustión y con el calentamiento eléctrico (sin humidificación).....31



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

La operación de secado es una de las más comunes entre las operaciones de conservación de productos alimentarios, y la más importante entre los procesos de deshidratación. Las operaciones por aire caliente requieren de un acondicionamiento del aire para disminuir su humedad relativa e inducir el transporte del agua hacia fuera del alimento. Una opción muy utilizada para llevar a cabo este acondicionamiento consiste en la utilización de quemadores que aumentan la temperatura del aire, reduciendo al mismo tiempo su humedad relativa.

El quemador acoplado al secador eleva la temperatura del aire con la energía obtenida de la reacción de combustión de productos orgánicos, generalmente divididos entre los de origen fósil y los de origen vegetal (biomasa). El aire cuando se calienta baja su humedad relativa al poder almacenar más moléculas de agua. Cuando este aire caliente, con una humedad relativa baja, entra en contacto con el alimento, hay una transferencia de agua del alimento al medio inducida por los potenciales químicos, donde el término más importante es el asociado a la diferencia entre la humedad relativa del aire y la actividad del agua del producto (Baker, 1997).

El quemador es la operación que más energía gasta del proceso y una de las que más contamina, por tanto una de las que más costes económicos y medioambientales genera en la planta. Las necesidades energéticas han crecido a medida que la industria alimentaria ha ido ganando en complejidad. Con la elevación del coste de la energía hay una tendencia a instalar equipos más eficientes energéticamente e investigar la viabilidad de fuentes energéticas alternativas más respetuosas con el medio ambiente (Berkowitz, 2012).

Normalmente los quemadores están dimensionados muy por encima de las necesidades de secado del producto, debido tanto a las deficiencias en los sistemas de control, como al bajo rendimiento de la propia combustión.

Además del problema del coste económico, los quemadores que funcionan con combustibles fósiles, gas natural y derivados del petróleo en general, alcanzan unas emisiones de CO<sub>2</sub> de ciclo largo muy elevadas (elevada huella de carbono). Este problema medioambiental que ocasionan las operaciones de combustión está ganando una importancia cada vez mayor entre la opinión pública y por tanto en los gobiernos, que apuestan por la eficiencia energética, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y una mejor gestión de los recursos como vía para mejorar la competitividad industrial (Talens, 2015).

La combinación de los elevados costes económicos de los quemadores de combustión, junto al problema medioambiental que generan, son las principales razones para estudiar en este trabajo de investigación alternativas viables de combustibles menos contaminantes o secadores más respetuosos con el medio ambiente.

### **1.2. SECADORES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA**

El objetivo fundamental de la deshidratación de alimentos es la reducción de la movilidad del agua por debajo de niveles que impidan el desarrollo de reacciones bioquímicas o contaminaciones microbianas. Los procesos de deshidratación ponen en contacto un alimento con una elevada actividad del agua con un fluido con una baja actividad del agua, de esta

forma se crea una inercia termodinámica (potencial químico del agua) que induce un flujo de agua desde el alimento al fluido.

Dentro de las distintas operaciones de deshidratación se encuentra el secado con aire caliente, donde las propiedades termodinámicas del aire son modificadas para aumentar su temperatura y reducir la humedad relativa, de esta forma aumenta la inercia termodinámica y por ende el flujo de agua del alimento al aire. La inercia termodinámica que provoca la deshidratación (Traffano-Schiffo et al., 2014) se describe según la siguiente ecuación (ecuación 1.1).

$$\Delta\mu_w = \frac{\Delta G}{\Delta n_w} = -s_w \cdot \Delta T + v_w \Delta P + RT \cdot \ln \frac{\phi_w}{a_w} \quad (\text{ec. 1.1})$$

Donde  $\mu_w$  es el potencial químico del agua ( $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $G$  es energía libre expresada en  $\text{J}$ ,  $n_w$  son moles de agua,  $s_w$  ( $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) es entropía parcial molar,  $\Delta T$  diferencia de temperatura ( $\text{K}$ ),  $v_w$  volumen parcial molar ( $\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $\Delta P$  diferencia presión ( $\text{atm}$ ),  $R$  constante de los gases ideales ( $8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $\phi_w$  humedad relativa del aire y  $a_w$  actividad del agua del alimento.

La deshidratación del alimento tiene como principal objetivo, en la mayoría de los casos, aumentar la estabilidad del producto, ya que al bajar la actividad del agua se disminuye la velocidad de degradación del producto como muestra la figura 1.1. Además del objetivo principal, el secado disminuye los costes de almacenamiento y transporte al ser más estable, manejable y disminuir su peso y volumen.

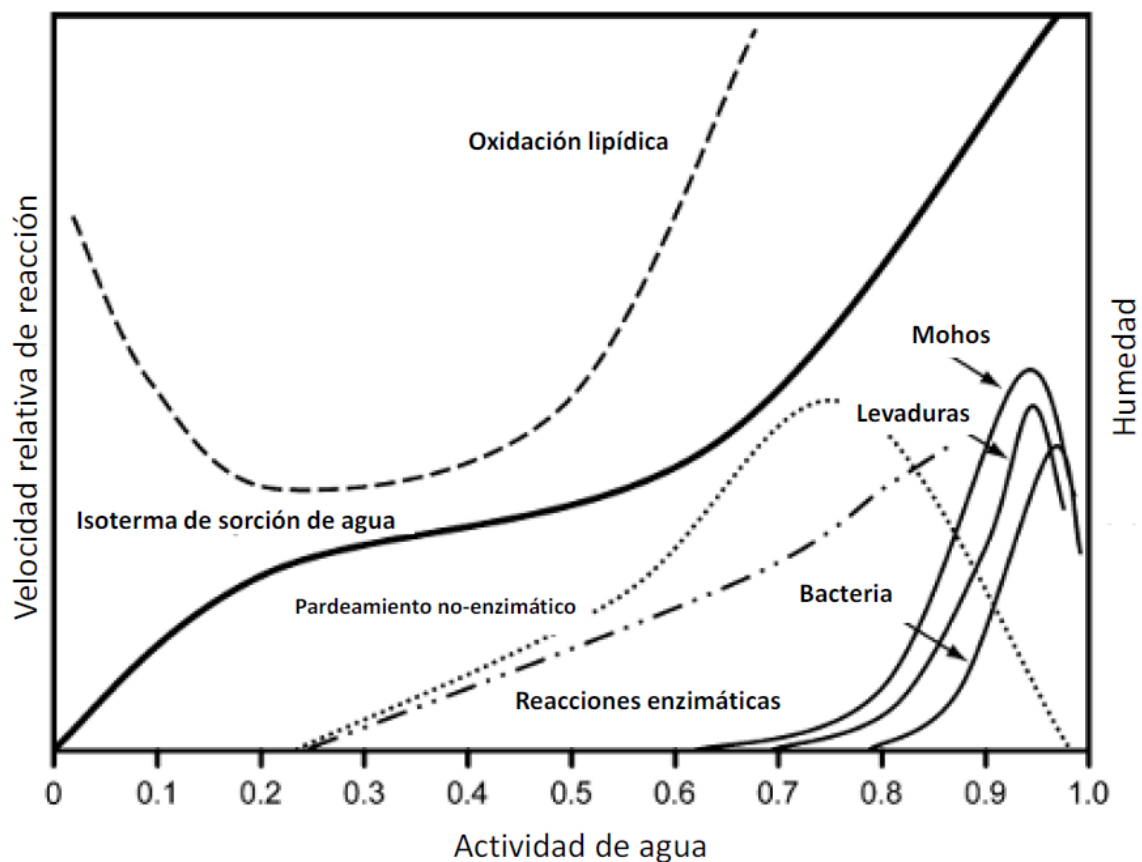


Figura 1.1. Evolución de la degradación de los alimentos con distintas actividades del agua (Labuza y Altunakar, 2007).

### 1.3.1. FUNDAMENTOS DEL SECADO CON AIRE CALIENTE

Como operación de secado se entiende la deshidratación de un producto poniéndolo en contacto con un fluido que tenga un potencial químico del agua menor, este proceso de bajada de la actividad del agua se puede producir independientemente de si hay cambio de estado.

En el caso del secado con aire caliente, el principal factor que induce el gradiente de potencial químico para deshidratar es un caudal de aire con baja humedad relativa que contraste con la humedad del producto. El gradiente del potencial químico de agua en la interfase del fluido y el alimento se puede definir con la ecuación 1.2 (Castro-Giráldez et al., 2014):

$$\Delta\mu_w = \frac{\Delta G}{\Delta n_w} = v_w \Delta P - s_w \Delta T + F \Delta l + \Psi \Delta e + \sigma_w \Delta A + RT \Delta \ln(a_s) \frac{\Delta n_s}{\Delta n_w} + RT \Delta \ln a_w \quad (\text{ec. 1.2})$$

Donde  $\Delta\mu_w$  es el gradiente de potencial químico del agua en la interfase/alimento,  $G$  es la energía libre de Gibbs,  $v_w$  es el volumen específico del agua,  $\Psi$  el potencial eléctrico,  $F$  la fuerza parcial polar del agua,  $a_w$  como actividad del agua,  $P$  la presión absoluta,  $l$  la variación de elongación del sistema,  $\sigma_w$  la tensión superficial del agua,  $A$  el área,  $R$  es la constante de los gases ideales,  $T$  la temperatura,  $e$  el movimiento de cargas eléctricas,  $a_s$  es la actividad de la especie química del soluto,  $s_w$  la entropía parcial molar del agua,  $n_s$  el número de moles de los solutos y  $n_w$  el número de moles de agua.

Para el secado de alimentos, normalmente se utiliza aire caliente con temperaturas inferiores al cambio de estado del agua, por tanto, la fórmula se adapta y se utiliza la fórmula 1.3 (Traffano-Schiffo et al., 2014):

$$\Delta\mu_w = \frac{\Delta G}{\Delta n_w} = v_w \Delta P - s_w \Delta T + RT \ln \frac{\varphi}{a_w} \quad (\text{ec. 1.3})$$

Donde  $\varphi$  es la humedad relativa del aire caliente en tanto por uno.

Cuando se utiliza elevadas temperaturas en el secado con aire caliente, el producto final alcanza una deshidratación que le confiere mucha estabilidad, sin embargo, estas temperaturas también producen otras transformaciones en los alimentos que en algunas ocasiones degradan su calidad. Las principales transformaciones no deseadas son el “encostramiento” (compactaciones del tejido), las reacciones de Maillard (pardeamiento) y Streker (68 °C) y en temperaturas muy elevadas se puede dar la pirólisis (200 °C).

Crear un gradiente de potencial químico del agua en el sistema provoca una inercia termodinámica que impulsa el transporte de agua del producto al aire, lo que exige un aporte de energía que induzca este cambio de estado del agua. Esta energía proviene de la energía interna del aire, por tanto esta disminuye, pero si hay alguna otra fuente de energía con más disponibilidad (como la aportada por el microondas) el sistema evoluciona y emplea esa energía para cambiar el estado.

Para que el proceso de secado con aire caliente se lleve a cabo con la máxima velocidad, la energía aportada por el aire debe tener las mínimas interferencias posibles, para ello se busca eliminar la capa límite equivalente que hay entre el producto y el aire, esta situación se alcanza al superar una velocidad del aire de 5,13 m·s<sup>-1</sup> (Green y Perry, 2007).

El proceso de secado puede dividirse en tres etapas en función de la velocidad de secado:

- Primera etapa o periodo de inducción (velocidad creciente): Esta etapa corresponde al período de inducción, en ella el transporte de agua se produce por la diferencia de

potencial químico del agua entre el fluido y el producto. Durante esta etapa se acoplan tres fenómenos que conforman el flujo de agua: transporte interno del agua o movilización del agua interna del alimento, evaporación superficial del agua y transporte del agua a través del aire. La temperatura de la superficie evoluciona hasta la temperatura húmeda del aire pudiendo coincidir con la de saturación adiabática si se elimina la resistencia externa a la transmisión de calor ( $v_{\text{aire}} > 5,13 \text{ ms}^{-1}$ ).

- Segunda etapa o periodo de velocidad de secado constante (velocidad constante): En este periodo la velocidad de secado es constante y máxima. La temperatura se mantiene constante e igual a la temperatura húmeda. Durante este periodo se moviliza la mayor cantidad de agua del producto y viene condicionada con la facilidad de movilidad que tenga por el interior del alimento así como por la cantidad de agua retenida por mecanismos eléctricos (agua adsorbida) o mecánicos (agua retenida). Cuando se alcanza un nivel de humedad a partir del cual la velocidad de transporte se reduce por debajo de la velocidad de evaporación superficial, el transporte interno de agua pasa a gobernar el transporte total de agua y la superficie del producto se seca alcanzándose en superficie la temperatura seca o temperatura de secado. Este nivel de humedad se denomina humedad crítica.
- Tercera etapa o periodo de velocidad de secado decreciente (velocidad decreciente): Hasta este instante la evaporación superficial de agua gobernaba el transporte de agua, pero en este periodo el transporte de agua por el interior es el más lento y por tanto pasa a gobernar el transporte de agua, en este punto la superficie evapora toda el agua que le llega, alcanzando la temperatura de secado. En este periodo los mecanismos involucrados en el transporte están asociados a la estructura interna del alimento. En sistemas celulares el transporte de agua vendrá condicionado fundamentalmente por el transporte transmembrana y por los fenómenos de adsorción superficial. En los sistemas coloidales dependerá de si la fase acuosa es la continua o no. Al mismo tiempo, existen casuísticas específicas que pueden reducir la velocidad interna del agua como por ejemplo fenómenos de retención mecánica asociados a glóbulos de almidón, barreras al transporte de agua por especies químicas hidrófobas como en semillas oleaginosas, fenómenos de relajación del tejido que provoquen gradientes de presión como la plasmólisis celular, procesos de compactación de células o micelas como en los procesos de encostramiento, procesos de vitrificación de azúcares o de cristalización de sales como en los procesos de escarchado o salado, etc..

Por la complejidad que representa describir en su totalidad el transporte interno de agua, a través de tejidos celulares o coloidales, la tercera etapa o periodo de velocidad de secado constante es el más complejo y difícil de modelizar.

### 1.3.2. TERMODINÁMICA DEL AIRE HÚMEDO

Toda operación de deshidratación requiere de un fluido con un potencial químico del agua inferior al del alimento, para llegar a esta situación, cuando el fluido empleado es el aire, es necesario acondicionarlo. Para su acondicionamiento se pueden aplicar dos procesos: la deshumidificación por reducción de la carga neta del agua y el aumento de la capacidad del almacenamiento, calentando el aire para expandirlo.

En las operaciones de secado con aire caliente, el acondicionamiento se basa en el calentamiento de una corriente de aire con un quemador, resistencia u otro método. Por

tanto, el conocimiento de las propiedades termodinámicas del aire húmedo en cada punto del sistema es necesario para modelizar correctamente la operación.

El término “aire húmedo” hace referencia a la totalidad del aire, es decir, a la mezcla de nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, argón y agua. Cuando todos los componentes salvo el agua se agrupan se denomina “aire seco”, ya que la relación entre las especies químicas se mantiene casi constante en la atmósfera (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

Para seguir la evolución del aire durante el acondicionamiento y secado del alimento se utilizan diagramas que agrupan las propiedades termodinámicas del aire que describen la cantidad, estado y nivel de energía del agua.

La humedad absoluta (X) es la razón másica de agua que tiene el aire y representa el contenido en agua en una cantidad de aire y se expresa en  $\text{kg}_w \cdot \text{kg}_{as}^{-1}$ . Cuando el aire está en condiciones normales presenta un comportamiento ideal, por tanto, la razón y fracción molar se explican de forma barométrica y volumétrica. De acuerdo con esto, la humedad absoluta será la razón molar expresada barométricamente (ecuación 1.4).

$$X = \frac{M_r w \cdot p_v}{M_r as \cdot (P - p_v)} \quad (\text{ec. 1.4})$$

Donde  $M_r$  es la masa molecular en  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $p_v$  es la presión parcial de vaporización en mmHg y P es la presión absoluta del aire en mmHg. El subíndice w indica el agua y el as el aire seco.

En la figura 1.2 se puede ver las propiedades físicas del aire necesarias para el cálculo de sus propiedades termodinámicas.

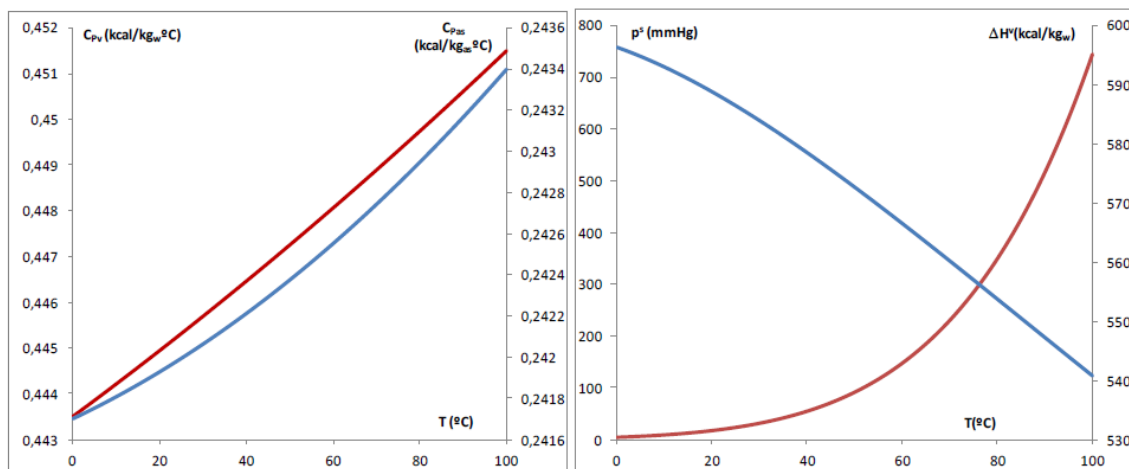


Figura 1.2. Izquierda: Calor latente de vaporización en azul y presión parcial de saturación en rojo. Derecha: Calor específico del aire en azul y calor específico del agua en forma de vapor en rojo (Green y Perry, 2007).

En función de la temperatura y la presión absoluta hay un límite en la mezcla del agua con el resto de componentes del aire seco, este umbral es la presión de saturación. A partir de 373,946 °C el agua se vuelve inmisible en el aire (Treybal, 1980). Por tanto, si se fija la presión absoluta, para cada temperatura hay un valor de presión parcial de saturación ( $p_s$ ) y una humedad absoluta de saturación ( $X_s$ ) (ecuación 1.5).

$$X_s = \frac{M_r w \cdot p_s}{M_r as \cdot (P - p_s)} \quad (\text{ec. 1.5})$$

La humedad absoluta de saturación es la máxima concentración de agua que puede alcanzar la corriente de aire. El diagrama psicrométrico construido con la humedad absoluta en las abscisas frente a la temperatura en las ordenadas se le denomina diagrama de Mollier (figura 1.3). En él también se puede representar la entalpía y la humedad relativa.

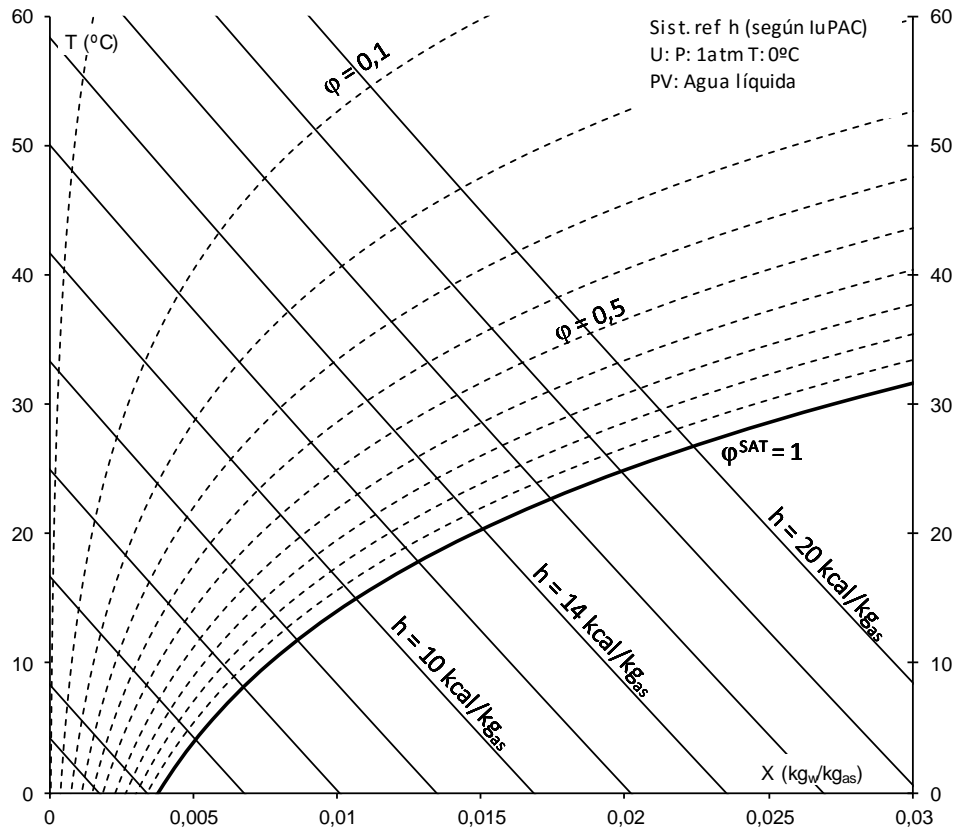


Figura 1.3. Ejemplo de diagrama de Mollier.

La humedad relativa ( $\varphi$ ) describe la proximidad que tiene un volumen de aire de alcanzar la máxima concentración de agua. Se define en la ecuación 1.6:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} \quad (\text{ec. 1.6})$$

La entalpía total del aire húmedo ( $h$ ) define la cantidad de energía que tiene el aire por unidad de masa y se puede calcular sumando la energía interna ( $u$ ) y el trabajo de flujo ( $P \cdot V$ ). Esta magnitud requiere de un sistema de referencia para su cálculo que sitúe el umbral de la entalpía cero, el más utilizado por la comunidad científica es el recomendado por la **IUPAC** en condiciones normales ( $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 1 \text{ atm}$  y agua en estado líquido).

El cálculo de la entalpía de vaporización se realiza teniendo en cuenta que toda el agua está en forma de vapor (ecuación 1.7):

$$h_v = \Delta G^v + C_{p,w}(T - 0) \quad (\text{ec. 1.7})$$

Donde  $\Delta G^v$  es la entalpía de vaporización del agua en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $C_{p,w}$  es el calor específico del agua en forma de vapor en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  y  $T$  es la temperatura del aire en  $^\circ\text{C}$ .

La entalpía de aire seco ( $h_{as}$ ) no contabiliza el trabajo de flujo, así que solo es necesario incluir en la ecuación el cambio en la energía interna (ecuación 1.8):

$$h_{as} = C_{p\ as}(T - 0) \quad (\text{ec. 1.8})$$

Por lo tanto, la variación de entalpía del aire (h) respecto al sistema de referencia propuesto por la luPAC se expresa en base al caudal de aire seco para facilitar los balances en el posterior diagrama según la ecuación 1.9.

$$h = u + P \cdot V = (C_{p\ w} \cdot X + C_{p\ as}) \cdot (T - 0) + X \cdot \Delta G^v \quad (\text{ec. 1.9})$$

Tanto los calores específicos como el calor latente de vaporización varían en función de la temperatura del aire según las ecuaciones empíricas (Tablas 1.1. y 1.2.).

Tabla 1.1. Parámetros empíricos de una ecuación polinómica de grado 4, que permite predecir el calor específico de las especies químicas que conforman el aire.

	a	b	c	d
$C_{PO2}$	-3,01E-10	2,46E-07	2,27E-04	9,11E-01
$C_{PCO2}$	3,92E-10	-9,54E-07	1,06E-03	8,18E-01
$C_{PN2}$	-3,53E-10	5,42E-07	-3,18E-05	1,04E+00
$C_{PH2O}$	0	1,39E-07	7,03E-05	4,43E-01

Tabla 1.2. Parámetros empíricos de una ecuación polinómica de grado 5, que permite predecir el calor latente de vaporización del agua.

$\Delta G^v$	a	b	c	d	e
	-5,51E-08	2,70E-05	-5,09E-03	-2,86E-01	5,96E+02

Una vez preparadas todas las ecuaciones para el cálculo de cada propiedad termodinámica del aire, necesarias para conocer los cambios de composición y energía a lo largo del sistema, hay que obtener herramientas para el cálculo de los caudales másicos, importantes ya que las propiedades están calculadas por unidad de masa. El caudal volumétrico (Q) puede ser calculado fácilmente con la velocidad del aire deseada (v) y la sección de circulación (S) (ecuación 1.10), pero para la transformación a caudal másico (M) (ecuación 1.12) son necesarias las propiedades termodinámicas del aire para el cálculo de la densidad del aire húmedo ( $\rho_{ah}$ ) (ecuación 1.11).

$$Q = v \cdot S \quad (\text{ec. 1.10})$$

$$\rho_{ah} = \frac{M_{r\ as} \cdot P}{R \cdot T} - \frac{(M_{r\ as} - M_{r\ w}) \cdot p_s \cdot \phi}{R \cdot T} \quad (\text{ec. 1.11})$$

$$M = Q \cdot \rho_{ah} \quad (\text{ec. 1.12})$$

Aun así, todos los cálculos de humedades del aire están expresados en forma de humedad absoluta (razón másica) y para ello se utiliza el caudal másico de aire seco. Por tanto, el caudal de aire húmedo hay que transformarlo en aire seco (M') mediante la ecuación 1.13:

$$M' = \frac{M}{1+X} \quad (\text{ec. 1.13})$$

### 1.3.3. FUNCIONAMIENTO DE UN QUEMADOR: ACOPLAMIENTO A UN SECADOR

Existen distintas técnicas para acondicionar el aire, la más utilizada en la industria por su reducido coste energético, en comparación con las alternativas existentes, es la combustión de compuestos de origen fósil en una cámara de combustión.

En estas operaciones de acondicionamiento, una pequeña proporción del aire de secado se mezcla con una llama inducida por la combustión de un compuesto químico inflamable, esta corriente de aire alcanza la temperatura de combustión, que al mezclarse posteriormente con una corriente de aire a temperatura ambiente, alcanza la temperatura de secado adecuada (figura 1.4).

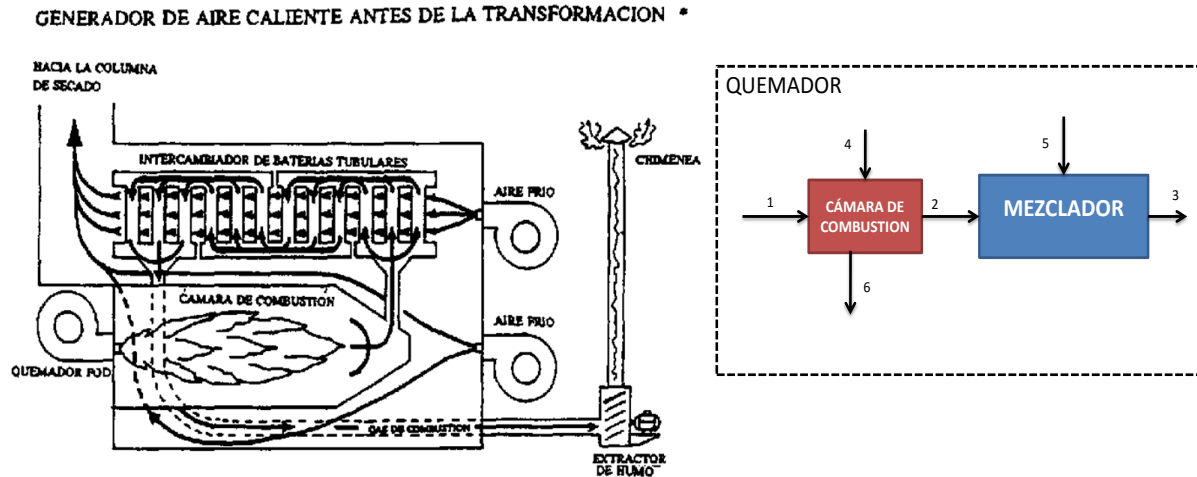


Figura 1.4. Esquema de quemador acoplado al mezclador de aire.

#### 1.4.1. PROBLEMÁTICA DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> DE CICLO LARGO Y LA HUELLA DE CARBONO

Desde el siglo XX la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera ha ido en aumento principalmente debido a las actividades humanas. Las perturbaciones en el ciclo global del carbono, por pequeñas que sean, modifican el clima del planeta debido a las propiedades físicas de gases como el dióxido de carbono o el metano, que aumentan la reflectancia sobre la emisión de fotones en infrarrojos (la emisión que realiza la tierra hacia el espacio exterior) y por tanto favorecen el aislamiento radiante de la tierra, denominado efecto invernadero, por tanto, a mayores concentraciones de estos gases en la atmósfera, mayor cantidad de radiación infrarroja regresara a la tierra con el consiguiente calentamiento de la superficie y por tanto con un aumento de la temperatura media global. Este aumento de la temperatura media del planeta está produciendo cambios climáticos, que en algunas zonas del planeta comienzan a ser dramáticos.

Parte de esta emisión de gases de efecto invernadero es aportado por las industrias agroalimentarias, siendo la combustión una de las fuentes más importantes. En este trabajo se aborda concretamente la emisión de CO<sub>2</sub> por parte del quemador que acondiciona el aire para el secado, ya que es una de las operaciones más comunes en el sector y tiene un elevado impacto en la energía total del proceso.

Esta problemática está generando una preocupación internacional por sus consecuencias y ha obligado a las organizaciones a ampliar su conocimiento sobre los gases de efecto invernadero. Para ello se utiliza como un indicador reconocido la huella de carbono, este se define como la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera que provienen de las actividades de producción, consumo o servicios y permite su medida en muchos rangos, desde tan solo las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta otras más complejas, asociadas al ciclo de vida de las emisiones del proceso entero (Comisión Europea, 2010).



Conocer la huella de carbono es un indicador útil para el proceso ya que identifica oportunidades de reducción en la emisión de los gases de efecto invernadero, que si se aprovechan, normalmente derivan en una reducción en el consumo energético de la planta y por tanto se obtiene un ahorro económico, mejoran la reputación corporativa de cara a los consumidores e inversores y, sobre todo, hay una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero que ayuda al medioambiente (MAGRAMA, 2015).

El ecosistema terrestre genera y consume el dióxido de carbono a través de las plantas y los animales, realizándose un balance neto productivo nulo. Por esta razón, la utilización de material vegetal para producir energía a partir de la combustión del mismo, representa la devolución a la atmosfera de parte del dióxido de carbono sustraído de la misma en la producción de tejido vegetal. Sin embargo, cuando la fuente de energía utilizada es un combustible de origen fósil, el balance neto se rompe, ya que el dióxido de carbono sustraído de la atmosfera para la generación de plantas y animales en era Mesozoica (65,5 millones de años) ya ha sido reequilibrado en la atmosfera por lo que la combustión del mismo solo incrementa la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmosfera.

Por esta razón existen dos tipos de ciclos de carbono, el ciclo corto y el ciclo largo. El ciclo corto engloba la producción de CO<sub>2</sub> que se devuelve a la atmosfera sin variar su concentración neta, debido a que entra dentro del ciclo de procesado por parte de las plantas evitando las consecuencias nocivas al medioambiente.

En el ciclo largo la producción de CO<sub>2</sub> se queda en la atmósfera aumentando su concentración, provocando una descompensación de la composición de la atmosfera y aumentando los problemas medioambientales a corto y medio plazo asociados a agravar el efecto invernadero.

## **1.5. COMBUSTIBLES PARA LA ALIMENTACIÓN DEL QUEMADOR**

### **1.5.1. COMBUSTIBLES CLÁSICOS O FÓSILES**

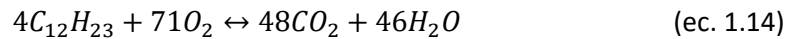
- Diésel

El diésel (por el inventor del motor diésel “Rudolf Diesel”) o gasóleo, es una mezcla compleja de hidrocarburos procedentes del refinado del petróleo, líquido y usado normalmente como combustible. Aunque el más conocido sea el gasóleo A, utilizado en los motores de combustión del sector de la automoción, también existen los gasóleos B (máquinas agrícolas e industriales) y C (gasóleo para calefacción).

Su poder calorífico es de 44,8 MJ·kg<sup>-1</sup> (NIST, 2016), por lo que es un combustible muy eficiente aportando energía cuando se quema. Es un combustible muy extendido, por tanto, se ha optimizado y adaptado mucho cada proceso en el que se usa, desde los motores diésel hasta los quemadores industriales, por lo que su margen de mejora es menor que el de otros combustibles.

A pesar de la gran cantidad de energía que aporta al sistema el quemado del gasóleo, es un combustible bastante contaminante, produce gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, que alteran el equilibrio de la atmósfera, y otras sustancias nocivas para la salud de las personas como el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), cuyas propiedades agravan los problemas respiratorios.

La reacción de combustión de este hidrocarburo está representada en la ecuación 1.14:



- Gas natural

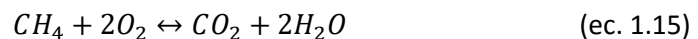
El gas natural es una mezcla de hidrocarburos en forma de gas, compuesto principalmente de metano (CH<sub>4</sub>) y entre un 5 % y un 10 % de otros hidrocarburos como el etano, propano y butano. Se extrae de yacimientos de gas o de yacimientos petrolíferos.

El poder calorífico del metano es de 55,5 MJ·kg<sup>-1</sup> (NIST, 2016), por tanto, es un combustible que es capaz de aportar bastante energía con su combustión. Como el diésel, es un combustible muy extendido en el calentamiento de fluidos como el agua y el aire, por tanto, gran parte de la maquinaria usada está muy adaptada a su uso.

Aunque la temperatura de ignición espontánea es prácticamente el doble que el diésel o la gasolina no es un buen indicador de la seguridad, ya que al estar en forma gaseosa no necesita energía para evaporarse antes de combustionar como los combustibles líquidos o sólidos, por tanto, si consigue energía de otra fuente será más inflamable.

Con la combustión del gas natural se produce además de agua, dióxido de carbono en niveles que contribuyen al calentamiento global. Produce menos gases de efecto invernadero que otros derivados del petróleo ya que, como se puede comprobar en la estequiometría de la combustión, por cada molécula de CO<sub>2</sub> que genera la reacción se generan dos moléculas de H<sub>2</sub>O, en cambio, en la combustión del gasóleo se produce prácticamente una molécula de H<sub>2</sub>O por cada una de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, si los yacimientos tienen fugas y se libera el gas natural a la atmósfera puede resultar en una aportación de gases de efecto invernadero muy significativa, dado que el metano equivale a 25 veces el efecto invernadero del dióxido de carbono (MAGRAMA, 2015).

La reacción de combustión del metano, mayoritario en el gas natural, es la presentada en la ecuación 1.15:



### 1.5.2. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Otra forma de ayudar al medioambiente es el uso de combustibles menos contaminantes, normalmente combustibles que provienen de residuos vegetales.

- Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es un material lignocelulósico compuesto hasta un 80 % de celulosa, hemicelulosa y lignina (Valverde et al., 2007). Este residuo se obtiene en la operación del descascarillado del arroz una vez recolectado, limpiado y secado. Tradicionalmente, la cascarilla del arroz se ha usado como sustrato para plantas, camas para aves o caballos y para fabricar el compost pero hay un cambio de tendencia a usar este tipo de biomasa como sustitutivo de combustibles fósiles.

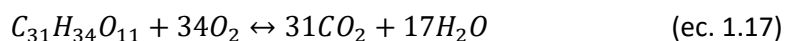
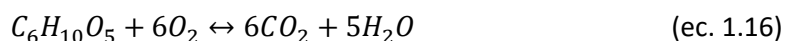
El poder calorífico de la cascarilla varía en función de su composición en celulosa, hemicelulosa y lignina, además disminuye cuanta más humedad tiene. Para compararlo en este apartado de combustibles, con un 10 % de humedad, su poder calorífico es de 17,644 MJ·kg<sup>-1</sup> (Valverde et al., 2007).

Como toda la biomasa, la cascarilla de arroz es nueva en el barrio de los combustibles, por tanto la industria se encuentra en proceso de transformación tomando como punto de partida los sistemas de calentamiento por combustibles fósiles. En este sentido los estudios sobre su uso como aporte energético están en auge, mostrando un mayor respeto al medio ambiente respecto de los combustibles fósiles y generando una oportunidad económica para las empresas que requieren de operaciones térmicas.

La cascarilla emite menos gases de efecto invernadero que los combustibles como el gasoil o el gas natural al producir una menor cantidad de CO<sub>2</sub>, pero su poder calorífico es la mitad que el aportado por esos combustibles.

La producción de arroz de la campaña 2014-2015 representa 494,5 millones de toneladas a nivel mundial (FAO, 2014), este nivel de producción abre la posibilidad de utilizar realmente este subproducto para reducir el uso de combustibles fósiles más contaminantes, sobre todo en áreas como Sudamérica y Asia, con unas cuotas de producción de este cultivo muy altas y una industria en crecimiento y no tan encorsetada como la de países más desarrollados.

A continuación, se puede ver la reacción de combustión de la celulosa y hemicelulosa (ecuación 1.16) y la lignina (ecuación 1.17):



- Cáscara de nuez

La cáscara de la nuez es otro tipo de biomasa compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina principalmente. Este subproducto de la industria agroalimentaria se obtiene de la separación del fruto de la cáscara. Se convierte en una opción interesante, ya que solamente se llega a usar significativamente como sustrato.

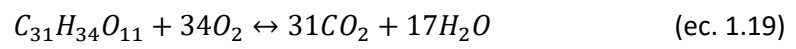
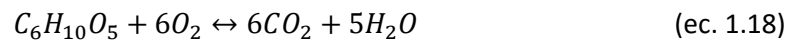
Su poder calorífico es de 16,28 a 18,61 MJ·kg<sup>-1</sup> según Green y Perry, 2007, aunque en los cálculos posteriores se utilice un poder calorífico calculado en función de su composición lignocelulósica. En comparación con la cascarilla del arroz, alberga una menor humedad, una mayor proporción de lignina (tiene mayor poder calorífico que la celulosa) y produce una menor cantidad de cenizas.

Si en la cascarilla del arroz se comentaba que una de sus ventajas respecto a los combustibles clásicos como los fósiles era la novedad y su posibilidad de tener un amplio margen de mejora, en el caso de la cáscara de la nuez está más acentuado, ya que en la cascarilla, aunque pocos, hay estudios y diseños para su aprovechamiento como combustible, pero en el caso del residuo de la nuez hay aún menos.

Como el resto de la biomasa, la utilización de la cáscara de la nuez aporta una menor producción de CO<sub>2</sub> en comparación con los combustibles fósiles, aporte que en muchos casos ya se está produciendo al quemar este tipo de residuos una vez dejan de ser útiles, suponiendo un desperdicio de energía.

A pesar de que todo parecen buenas noticias, la producción de la nuez no está tan extendida como la del arroz, frente a los casi 500 millones de toneladas del arroz, la nuez produce 1,585 millones de toneladas a nivel mundial (FAS-USDA, 2013), por lo que su potencial como sustitutivo de los combustibles actuales es menor que la cascarilla del arroz.

Como en la cascarilla de arroz, a continuación se puede ver la reacción de combustión de la celulosa y hemicelulosa (ecuación 1.18) y la lignina (ecuación 1.19):



## 2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

### 2.1. OBJETIVOS

El **objetivo general** del trabajo es sistematizar el dimensionamiento de quemadores para secadores industriales alimentarios, obteniendo no solo parámetros de diseño si no también parámetros ambientales y económicos.

Este objetivo general se subdivide en diferentes objetivos particulares:

- Primer objetivo particular: cuantificar ciertas propiedades físicas de algunos residuos industriales lignocelulósicos para su incorporación como combustible al funcionamiento de quemadores industriales
- Segundo objetivo particular: sistematizar el dimensionamiento de la cámara de combustión y de su mezclador adyacente.
- Tercer objetivo particular: Obtener una comparativa del uso de combustibles procedentes de residuos lignocelulósicos con combustibles fósiles.

### 2.2. PLAN DE TRABAJO

- Revisión bibliográfica de búsqueda de combustibles alternativos a los combustibles fósiles menos contaminantes y/o más eficientes.
- Revisión bibliográfica de identificación y clasificación de las propiedades termodinámicas de los distintos combustibles, tanto los fósiles como los alternativos.
- Revisión bibliográfica del impacto medioambiental del exceso de emisión de gases de efecto invernadero y otros posibles problemas que conllevan la utilización de combustibles derivados del petróleo.
- Diseño de un modelo termodinámico y cinético de un quemador industrial acoplado a un mezclador de aire, para acondicionar las propiedades del aire de salida, con el fin de conocer las propiedades termodinámicas y la composición del aire en los distintos puntos del proceso.
- Medida y análisis de las temperaturas de combustión y fracción másica de cenizas de la cáscara de la nuez y la cascarilla del arroz.
- Análisis comparativo de aportación de energía y contaminación entre los combustibles fósiles y los asociados a residuos lignocelulósicos.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. MATERIAS PRIMAS

- Cascarilla de arroz

Las muestras de cascarilla de arroz provienen de la recolección del cultivo, realizada por la industria arrocera “Dacsa Group” en los campos de los alrededores de Valencia, España, que una vez recolectado el cultivo se eliminan los elementos gruesos, se seca a temperatura ambiente y finalmente se separa la cascarilla del grano.

Antes del experimental, se introducen las muestras en una estufa a 60 °C durante 24 horas para eliminar el agua y cuantificar correctamente el contenido de cenizas y de compuestos combustibles.

Se pesan cinco muestras de cascarilla de arroz con la misma masa en cinco placas Petri, esto se realiza con una balanza de tres decimales por el rango de masas que se maneja. Es importante que la cantidad de masa sea la misma para minimizar la variabilidad que aportaría superficies de contacto muy diferentes. El peso de las muestras tomadas es de  $0,07 \pm 0,001$  g.

La muestra se deposita en una placa de aluminio y se deposita la placa en la plancha ya calentada. Una vez combustionada se recogen las cenizas para pesarlas y compararlas con la masa inicial y conocer la fracción de cenizas.

- Cáscara de nuez

Para la obtención de la cáscara de nuez se ha recurrido a comprar la “Nuez California natural” de la cadena de supermercados “Mercadona”, bajo la marca “Hacendado”. Para acondicionar la muestra, primero se extrae la parte comestible de la nuez y la cáscara sobrante se tritura en fragmentos de  $2 \pm 0,2$  mm de arista para aumentar la superficie de contacto y facilitar la transmisión de calor.

Antes del experimental, se introducen las muestras en una estufa a 60 °C durante 24 horas para que el contenido en humedad de la cáscara no aumente y dificulte la combustión al evaporar el agua.

Se pesan cinco muestras de cáscara de nuez con la misma masa en cinco placas Petri, esto se realiza con una balanza de tres decimales por el rango de masas que se maneja. Es importante que la cantidad de masa sea la misma para minimizar la variabilidad que aportaría superficies de contacto muy diferentes. El peso de las muestras tomadas es de  $0,5 \pm 0,02$  g.

La muestra se deposita en una placa de aluminio y se deposita la placa en la plancha ya calentada. Una vez combustionada se recogen las cenizas para pesarlas y compararlas con la masa inicial y conocer la fracción de cenizas.

#### 3.2. PROTOCOLO DE TOMA DE MUESTRA

Protocolo de medida de temperatura de llama y fracción másica de cenizas:

Se enciende la plancha de cocina hasta que alcance una temperatura de  $500 \pm 50$  °C, se sitúa la Cámara termográfica Optris PI 160 a una altura de 30 cm por encima de la plancha con un ángulo incidente de 15°, suficiente para considerar despreciable el factor geométrico en el

cálculo de energía emitida por la muestra, pero suficiente como para no recibir el calentamiento directo de la plancha sobre el pirómetro (figura 3.1).

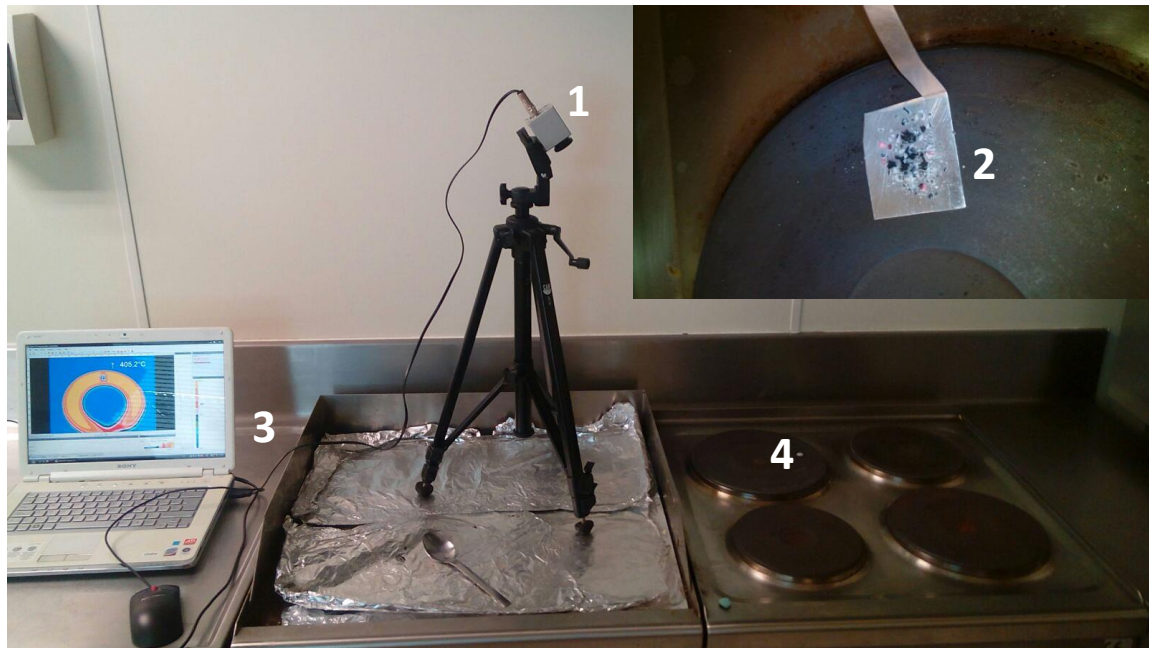


Figura 3.1. Montaje del experimental, donde: 1: Cámara termográfica Optris PI 160, 2: Placa de aluminio como soporte de la muestra, 3: Ordenador con el software para la toma de muestras, 4: Plancha que aporta la energía para llegar a temperatura de combustión.

La cámara va conectada a un ordenador donde está instalado el software Optris PI Connect, este programa registra las medidas de energía recibida y aplicando un modelo de Stefan-Boltzman (ecuación 3.1), con una emisividad de 1 y sin tener en cuenta la energía reflejada, transforma energías a temperaturas, obteniéndose un plano de temperaturas.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{ec. 3.1})$$

Donde E es el flujo de energía recibido por el pirómetro de la cámara ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $\varepsilon$  es la emisividad (sin unidades),  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzman ( $5,67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ) y T la temperatura expresada en K (Traffano-Schiffo et al., 2014).

Una vez la plancha alcanza su temperatura de régimen de trabajo, se pone a grabar la cámara y se sitúa en la zona de medida, previamente marcada sobre la plancha, la placa de aluminio cargada con la muestra previamente tarada.

La muestra se deja combustionar hasta los 8 min, tiempo suficiente para que se considere un tiempo infinito de combustión para la carga realizada. Una vez combustión la muestra se recoge en la placa Petri y se pesa para saber la fracción de cenizas.

Protocolo de medida de emisividad frente a la temperatura de cada materia prima:

Para la corrección de la emisividad de cada materia prima se utiliza el mismo montaje que en el experimental anterior, se enciende la plancha de cocina hasta que alcance una temperatura de  $500\pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$  y se sitúa la Cámara termográfica Optris PI 160 a una altura de 30 cm por encima de la plancha con un ángulo incidente de  $15^\circ$ , es decir, la misma posición. El termopar se sitúa al otro lado con la bola de punto caliente dentro de la muestra.

Una vez está la plancha a la temperatura objetivo se enciende la cámara, se pone a grabar y se toman medidas de temperatura del termopar a distintos tiempos, estos datos luego se cuadran con el video para saber la temperatura que da la cámara y compararla con la que da el termopar, siempre respetando el mismo punto de medida.

En el caso de la plancha con tomar un dato con el termopar y la cámara en el mismo punto es suficiente.

### 3.3. MEDIDAS DE INFRARROJOS

Las imágenes térmicas han sido adquiridas usando la Cámara termográfica Optris PI 160 (Optris GmbH, Berlín, Alemania). Esta usa un conjunto de plano focal bidimensional con 160x120 píxeles, un rango espectral de 7,5 a 13  $\mu\text{m}$ , una resolución de 0,05  $^{\circ}\text{C}$  y una precisión de  $\pm 2\%$ . La cámara cubre un rango de temperaturas de -20 a 900  $^{\circ}\text{C}$ . Tiene un campo de visión de 23°x17° con una distancia mínima de 2 cm. La cámara utiliza el software Optris PI Connect (Optris GmbH, Berlín, Alemania).

### 3.4. SECADO DE LA MUESTRA

Para el acondicionamiento de la muestra se ha empleado el método AOAC 934.06 (2000). Este método consiste en el secado de la muestra hasta que alcance un peso constante, en una estufa a 60  $^{\circ}\text{C}$ , a vacío (figura 3.2).



Figura 3.2. Estufa a vacío P.SELECTA mod. VACIOTEM.



### 3.5 MEDIDA DE LA MASA DE LA MUESTRA

Para realizar las medidas de masa de las distintas muestras se ha utilizado una balanza de precisión (Mettler Toledo, modelo AB304-S) (figura 3.3). Las muestras se secan antes de la medida de la balanza.



Figura 3.3. Balanza usada para medir la masa de las muestras.

## 4. RESULTADOS

Para poder desarrollar una sistematización del dimensionamiento de un quemador para secadores, empleados en la industria agroalimentaria, acoplado la utilización de residuos lignocelulósicos como alternativa a los combustibles fósiles, en primer lugar es necesario realizar una serie de medidas experimentales para obtener ciertas propiedades físicas.

Estas propiedades físicas y químicas van a delimitar el uso de estos combustibles, dando una idea del rendimiento energético y medioambiental de los mismos.

### 4.1. CÁLCULO DE TEMPERATURA DE LLAMA Y FRACCIÓN MÁSCICA DE CENIZAS

El proceso de cuantificación y monitorización de la combustión de cáscara de arroz y de nuez mediante espectrometría infrarroja requiere de la realización y modelización previa mediante el modelo de Stefan-Boltzman, para poder segregar la energía incidente sobre la superficie analizada, así como la obtención de la emisividad del cuerpo medido.

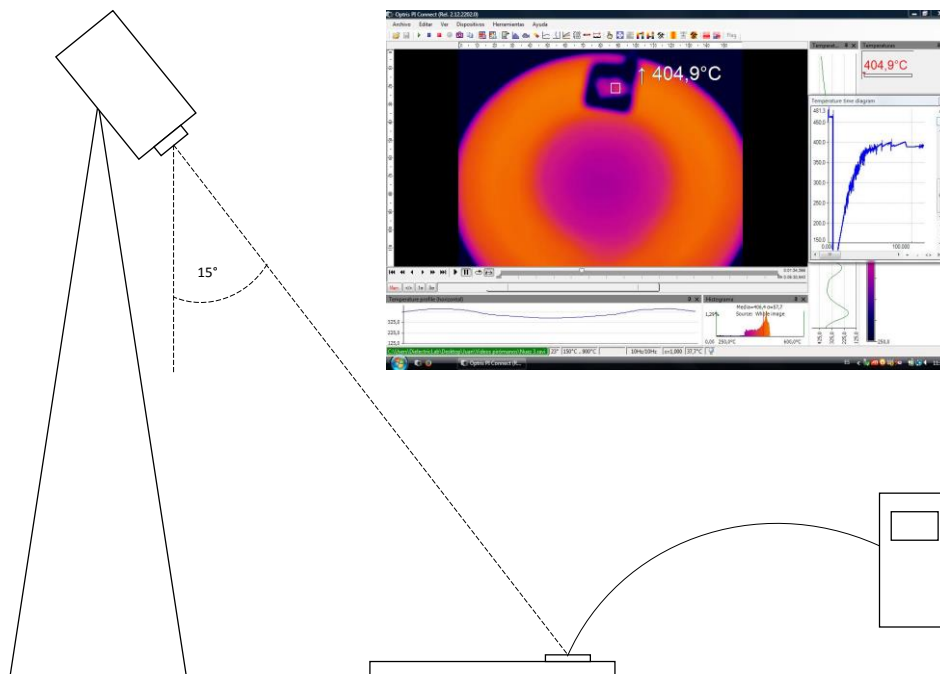


Figura 4.1. Montaje de la toma de muestras para el ajuste de la emisividad.

A partir de la ecuación 3.1 se puede definir la energía recibida por la cámara como:

$$E_T = \varepsilon_{cam} \sigma T_{cam}^4 \quad (\text{ec. 4.1.})$$

Donde  $E_T$  es la energía detectada por el pirosensor, la  $\varepsilon_{cam}$  es la emisividad marcada el software y  $T_{cam}$  es la temperatura respuesta que el software de la cámara muestra.

Sin embargo, dos fenómenos dificultan la transformación la energía que llega a al pirosensor con la temperatura superficial del emisor. En primer lugar se produce una sobreestimación de la energía emitida ya que al pirosensor no solo llega esta energía, además llega un aporte de energía procedente del entorno sobreestimando la temperatura. En segundo lugar el fluido que separa el emisor del pirosensor puede no ser totalmente transmisor, reduciendo la

energía del emisor en el trayecto. De tal manera que Traffano-Schiffo et al., 2014 desarrolló un modelo para poder segregar todos estos fenómenos, y se muestra en la ecuación 4.2.

$$E_T = F \varepsilon_m \sigma T_m^4 + (1 - \varepsilon_e) \sigma T_e^4 - (1 - \tau_{air}) F \cdot \varepsilon_m \sigma T_m^4 \quad (\text{ec. 4.2.})$$

Donde F es el factor geométrico, siendo 1 ya que el ángulo de disposición de la cámara lo permite,  $\tau$  la transmitancia, siendo los subíndices: m la muestra que emite durante la combustión, e la emisión del entorno y air las propiedades del aire. El primer término representa el flujo de energía emitido por la muestra; el segundo es el flujo de energía emitida por el entorno y el tercer término indica el flujo de energía absorbido por el aire. Este último se considera despreciable por la corta distancia que hay de la muestra a la cámara (menor de 20 cm) y la baja humedad relativa del ambiente.

Para obtener la emisividad de la muestra es necesario determinar la energía emitida por el entorno, este dato ha sido estimado por el material de referencia ( $E_{ref}$ ) con emisividad conocida ( $\varepsilon=0,95$  - Optris GmbH, Berlin, Germany). Con estos cálculos se obtuvo a distintas temperaturas la emisividad, dando los siguientes valores (ver tabla 4.1.).

Como se puede observar en la tabla 4.1, al producirse la combustión las muestras se aproximan al comportamiento de cuerpo negro, emitiendo única y exclusivamente la energía correspondiente a la energía interna de la superficie sin mostrar fenómenos de reflexión.

Tabla 4.1. Valores de emisividad de los residuos lignocelulósicos a distintas temperaturas.

	Valor de emisividades	
	Antes llama	Despues llama
<b>Arroz</b>	0,86	0,96
<b>Nuez</b>	0,86	0,99
<b>Plancha</b>	≈1	≈1

A partir de estos valores de emisividad se realizaron los ensayos de combustión marcando 3 térmicos a analizar. En la figura 4.2 y 4.3 se muestra la evolución de dos muestras a modo de ejemplo de cáscara de arroz y de cáscara de nuez, donde se describe el limite térmico de la temperatura de la plancha de calefacción, la temperatura de inicio de combustión y la temperatura de llama o temperatura máxima que alcanza el producto.

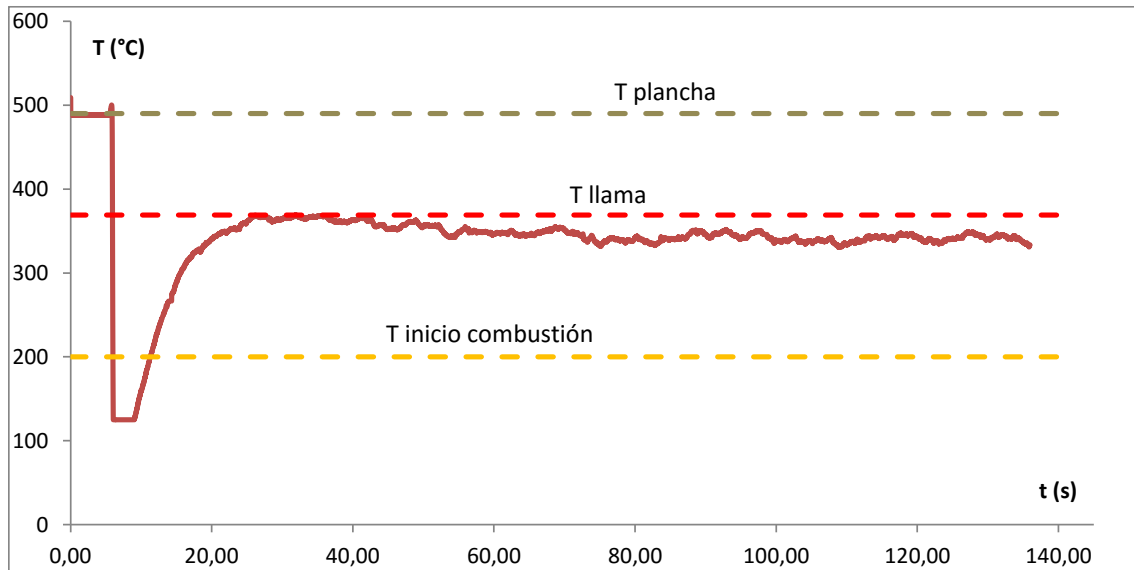


Figura 4.2. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de una muestra de cascarilla de arroz. Línea verde discontinua: Temperatura de la plancha (°C). Línea amarilla discontinua: Temperatura de inicio de la combustión (°C). Línea roja discontinua: Temperatura de llama (°C).

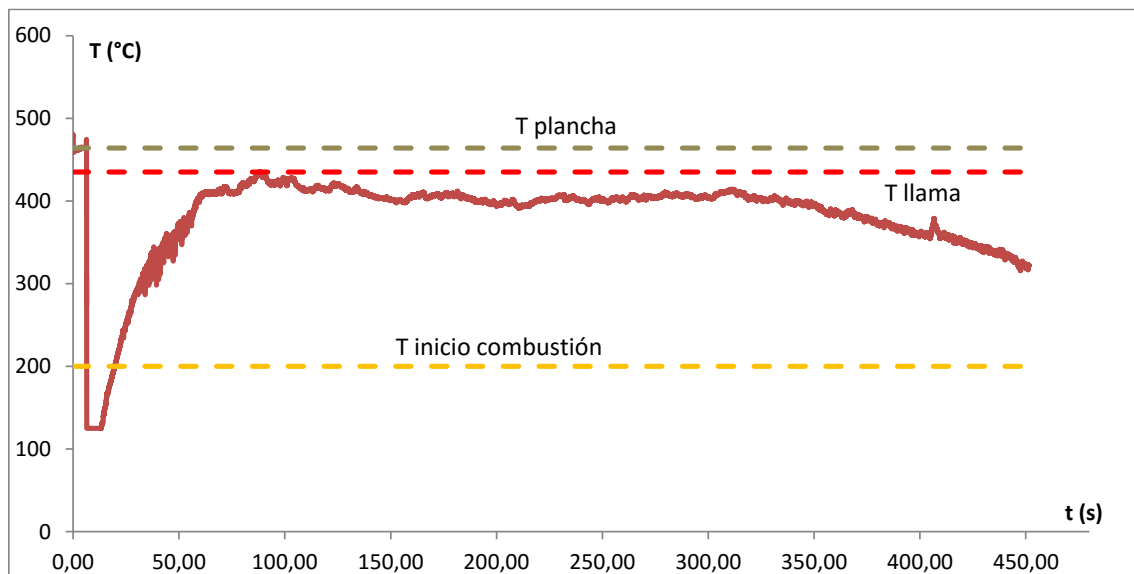


Figura 4.3. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de una muestra de cáscara de nuez. Línea verde discontinua: Temperatura de la plancha (°C). Línea amarilla discontinua: Temperatura de inicio de la combustión (°C). Línea roja discontinua: Temperatura de llama (°C).

A partir de estas parametrizaciones en las figuras 4.4 y 4.5 se muestran los experimentales para cada una de las muestras:

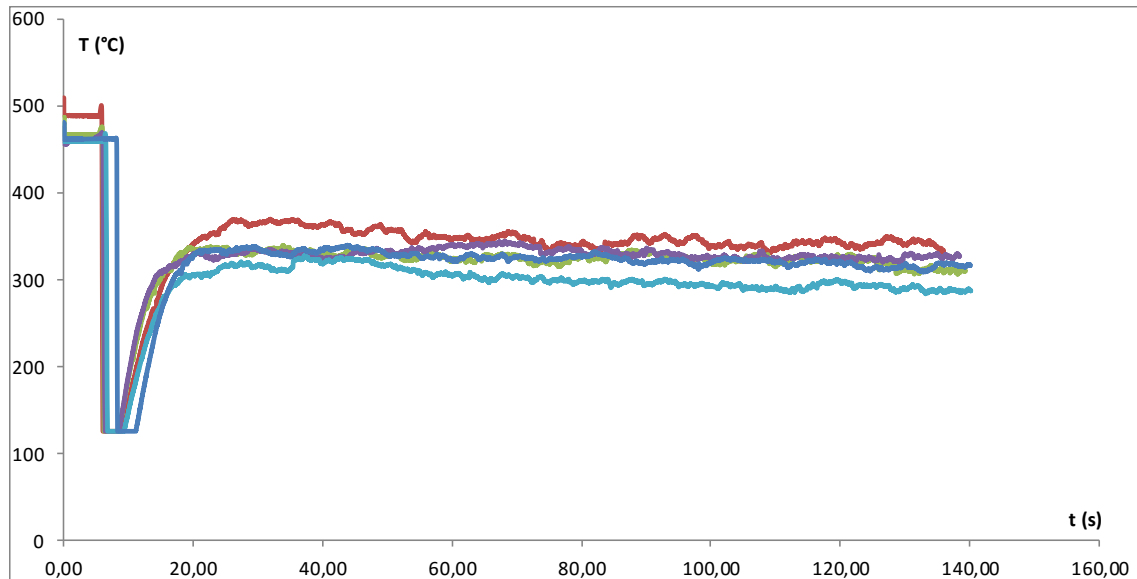


Figura 4.4. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de las cinco muestras de cascarilla de arroz.

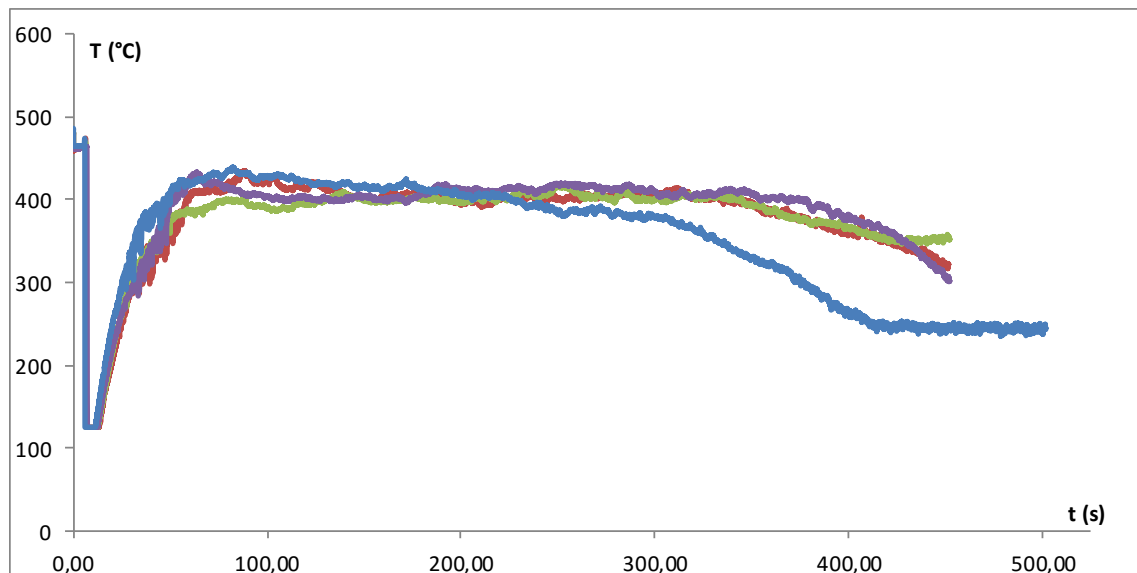


Figura 4.5. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de las cinco muestras de cáscara de nuez.

Como se observa en estas figuras los valores térmicos alcanzados en las muestras de nuez llegaron a temperaturas más elevadas que la cascarilla de arroz. En la tabla 4.2 se muestra la fracción másica de cenizas de la cascarilla de arroz y la cáscara de nuez que ha quedado después de la combustión, así como la temperatura de llama.

Tabla 4.2. Tabla de fracciones másicas de ceniza obtenida con los datos del experimental.

	Arroz	Nuez
$x \text{ (kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	$0,39 \pm 0,05$	$0,0098 \pm 0,0014$
$T_{\text{lama}}$	$344 \pm 15$	$429 \pm 10$

Los valores obtenidos en este apartado se utilizaran en el siguiente apartado en el dimensionamiento de quemadores.

#### 4.2. DIMENSIONAMIENTO DE UN QUEMADOR

En el dimensionamiento de quemadores hay que tener en cuenta los cambios de comportamiento que tiene el vapor del agua con la mezcla de gases que componen el denominado aire seco, una mezcla de nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono.

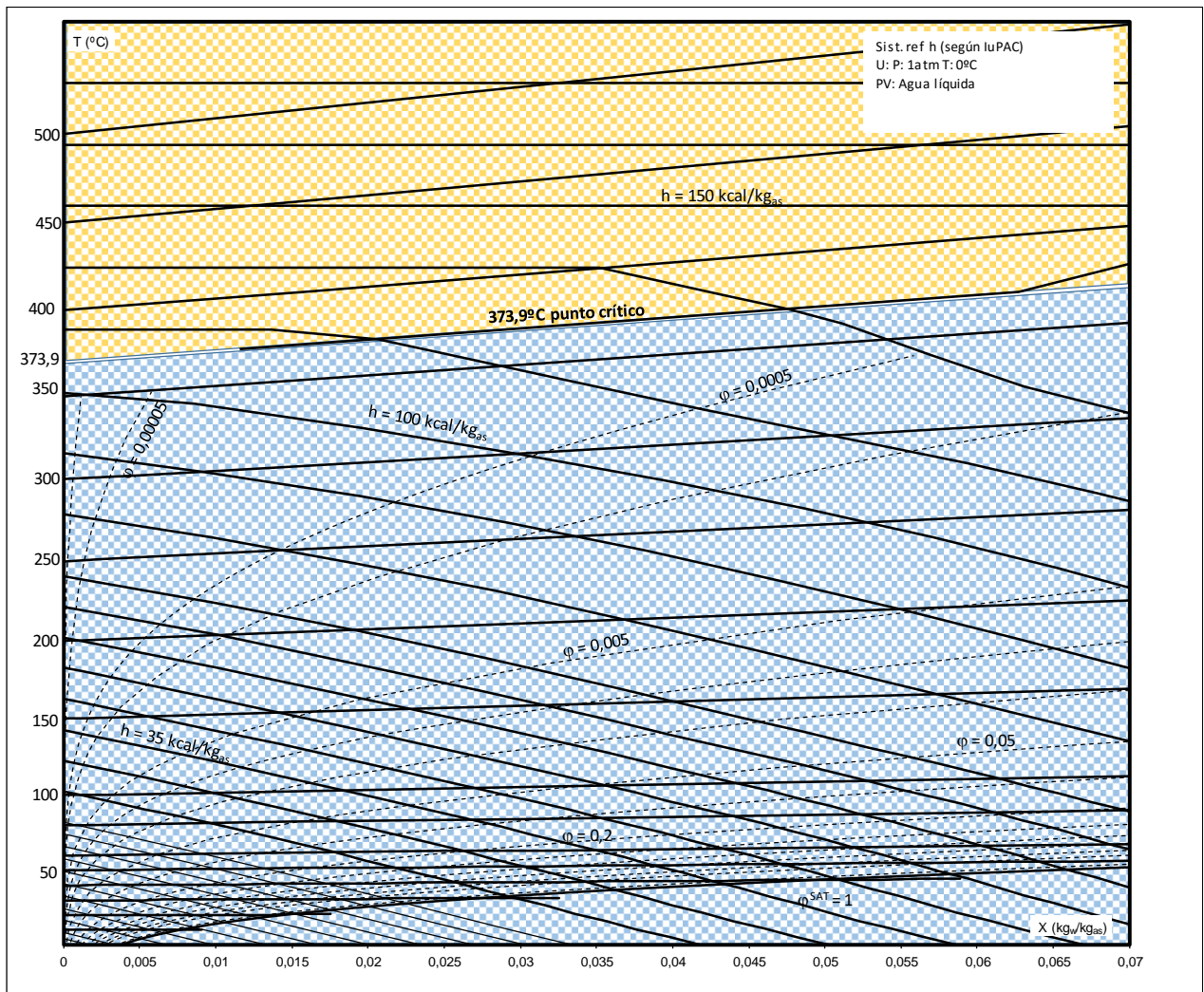


Figura 4.6. Diagrama Psicrométrico del aire húmedo (Diagrama de Mollier) hasta 550 °C mostrando la zona de miscibilidad (■) e inmiscibilidad (■) aire seco/agua.

El punto crítico del vapor del agua respecto al aire, a presión atmosférica, se encuentra a una temperatura de 373,9 °C, a partir de la cual el vapor del agua se convierte en inmisible con la mezcla de gases que componen el aire seco.

En la figura 4.6 se muestra un diagrama psicrométrico en formato Mollier a altas temperaturas donde se muestra la zona de miscibilidad a bajas temperaturas y de inmiscibilidad, las propiedades físicas del aire cambian a partir de este punto crítico.

A la hora de dimensionar un quemador, el primer paso es definir las etapas que lo componen (ver figura 4.7). Un quemador está compuesto por una cámara de combustión donde se introduce aire, se alcanza la temperatura de llama y, para asegurar una correcta combustión, se mantienen las fracciones volumétricas de oxígeno siempre por encima del 5 % (Zlochow y Green, 2009). Dado que las temperaturas de secado en alimentos siempre son bajas o moderadas ya que generalmente sufren termolabilidad, es necesario colocar una cámara de mezclado que reduzca la temperatura hasta la temperatura de secado, de tal manera que el control térmico de entrada en el secador dependerá no solo de la cantidad de combustible sino que también dependerá de las válvulas de entrada en el mezclador.

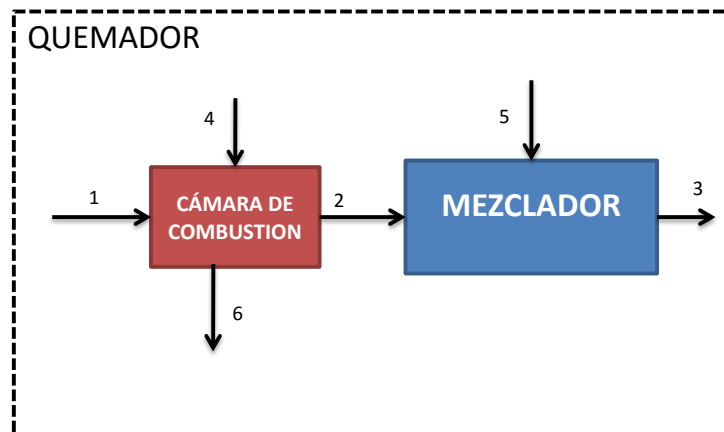


Figura 4.7. Esquema de un quemador. Detalle de la numeración de corrientes. Donde 1 y 5 son las corrientes de entrada de aire, 4 es la corriente de entrada de combustible, 6 es la salida de cenizas y compuestos no combustionables, 2 es el aire de salida de la cámara de combustión y 3 es la corriente de aire de secado.

Las variables de control vendrán definidas por el tipo de secado que se pretende realizar, por esta razón el diseño del quemador debe realizarse a partir de variables de salida. Las variables conocidas en el dimensionamiento serán el caudal de aire de salida del mezclador y la temperatura de salida. Estas dos variables serán a posteriori el caudal y la temperatura de secado.

Al mismo tiempo mediante termopsicómetros externos se mide la temperatura y la humedad relativa exterior, obteniéndose (respecto al esquema de la figura 4.7) la composición y temperatura de las corrientes de entrada de aire denominadas 1 y 5.

En la cámara de combustión se producirán procesos distintos si la combustión utiliza residuos lignocelulósicos o si utiliza combustibles fósiles. Si el combustible son los residuos vegetales se producirá por un lado las reacciones de pirolisis de los compuestos pirolizables (celulosa y hemicelulosa por un lado y lignina por otro), y por otro lado la evaporación del agua del residuo. Esto implica que en el balance de energía de la cámara de combustión habrá que

incluir el gasto energético de evaporar esta agua. En el caso de los combustibles fósiles este gasto energético no existe.

En la tabla 4.3 se muestran varias especies químicas combustionables, con su estequiometría de combustión y con las propiedades físicas y químicas necesarias para contabilizar los términos de generación de cada reacción.

Tabla 4.3 Tabla con la fórmula química, reacción de combustión, masa molecular ( $M_r$ ), calor específico ( $C_p$ ), calor latente de combustión ( $\Delta G$ ) y temperatura de llama ( $T_{llama}$ ) (Reed, 1978) (Haynes, 2015). \* Temperaturas halladas experimentalmente.

Componente	Fórmula	Reacción	$M_r$ (g·mol <sup>-1</sup> )	$C_p$ (kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\Delta G$ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	$T_{llama}$ (°C)
Celulosa	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> + 6O <sub>2</sub> = 6CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O	162,1406	1,4	16996	*
Hemicelulosa	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>6</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> + 6O <sub>2</sub> = 6CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O	162,1406	1,4	16592	*
Lignina	C <sub>31</sub> H <sub>34</sub> O <sub>11</sub>	C <sub>31</sub> H <sub>34</sub> O <sub>11</sub> + 34O <sub>2</sub> = 31CO <sub>2</sub> + 17H <sub>2</sub> O	582,59506	1,2	18012	*
Aceite / Ácido oléico	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	2C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> + 51O <sub>2</sub> = 36CO <sub>2</sub> + 34H <sub>2</sub> O	282,46136	1,79	39000	*
Glucosa	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> + 6O <sub>2</sub> = 6CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	180,15588	1,244	14080	*
Fructosa	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> + 6O <sub>2</sub> = 6CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	180,15588	1,244	14080	*
Gasoil	C <sub>12</sub> H <sub>23</sub>	4C <sub>12</sub> H <sub>23</sub> + 71O <sub>2</sub> = 48CO <sub>2</sub> + 46H <sub>2</sub> O	167,31102	2,05	44800	2138
Metano	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> = CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	16,04246	2,197	55500	1963
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + 7O <sub>2</sub> = 4CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	30,06904	1,6435	51900	1955
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 5O <sub>2</sub> = 3CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O	44,09562	1,6513	50350	1980
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> + 3O <sub>2</sub> = 2CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O	46,06844	2,44	29800	2082

Los siguientes datos necesarios para poder dimensionar el quemador es la composición del combustible. En la tabla 4.4 se muestran composiciones de cáscara de arroz.

Tabla 4.4. Tabla composicional con las relaciones entre los 3 carbohidratos combustionables de distintas variedades de cáscara de arroz. \*  $v_1, v_2, v_3, v_4$ : Variedades canadienses. \*  $v_5$ : Variedad colombiana. (Valverde et al., 2007), y variedades de nuez (Cuervo et al., 2009).

Elemento	Cascarilla de arroz					Media	Cáscara de nuez
	$v_1^*$	$v_2^*$	$v_3^*$	$v_4^*$	$v_5^*$		
Celulosa	29,20	33,47	25,89	35,50	19,53	28,72	27,50
Hemicelulosa	20,10	21,03	18,10	21,35	19,53	20,02	27,50
Lignina	20,00	18,80	24,60	18,20	22,80	20,88	35,00

Para completar la composición de los residuos lignocelulósicos, los valores de ceniza o compuestos no combustionables se muestran en la tabla 4.1 y en cuanto al contenido de agua, estos compuestos vegetales presentan una baja humedad que se encuentra entre el 15 y el 18 % (Valverde et al., 2007).

#### Planteamiento del balance global.

Aun así se presenta un valor de grados de libertad que no permite su cálculo por balances, de tal manera que es posible realizar un balance sobre el global incluyendo juntas las corrientes de aire externo. El procedimiento para el cálculo en el caso de los residuos lignocelulósicos es el siguiente:

##### 1. Balances estequiométricos

$$\frac{G_{combustible}^n}{n_{combustible} \cdot M_{r\ combustible}} = \frac{G_w^n}{n_w \cdot M_{r\ w}} = \frac{G_{CO_2}^n}{n_{CO_2} \cdot M_{r\ CO_2}} = \frac{G_{O_2}^n}{n_{O_2} \cdot M_{r\ O_2}} \quad (\text{ec. 4.3})$$



A partir de la cantidad y composición de residuo se obtiene la generación del resto de componentes (ecuación 4.4)

$$G_i^j = \frac{G_f^j \cdot n_i \cdot M_{r_i}}{n_f \cdot M_{r_f}} \quad (\text{ec. 4.4})$$

Donde  $M_r$  es la masa molecular,  $n$  es la relación estequiométrica de la reacción,  $x$  es la fracción másica, el superíndice  $j$  indica la especie química combustionable (celulosa o lignina), obteniéndose un grupo de generaciones para cada especie combustionable, es decir, una reacción de combustión distinta, tal y como se indica en la tabla 4.3. y los distintos subíndices indican el componente de la reacción de cada variable. Siendo  $i$ :  $O_2$ ,  $CO_2$  y  $H_2O$ .

## 2. Balance total

$$M_{1+5} = M_3 + m_6 - m_4 \quad (\text{ec. 4.5})$$

Donde  $M_1$  es el caudal másico de aire ambiente de entrada al quemador en  $kg \cdot h^{-1}$ ,  $M_3$  es el caudal másico de aire que sale del mezclador en  $kg \cdot h^{-1}$ ,  $m_4$  es el caudal másico de combustible de entrada al quemador en  $kg \cdot h^{-1}$  y  $m_6$  es el caudal másico de cenizas de salida del quemador en  $kg \cdot h^{-1}$ .

## 3. Balances de energía

### 3.1. Combustión

$$E_T^c = E_C + E_L = m_4 \cdot x_{C4} \cdot \Delta G_C^c + m_4 \cdot x_{L4} \cdot \Delta G_L^c \quad (\text{ec. 4.6})$$

Donde  $m_4$  es el caudal másico de entrada de combustible en  $kg \cdot h^{-1}$ ,  $x$  es la fracción másica en la que está presente cada componente en el combustible en  $kg \cdot kg^{-1}$ ,  $\Delta G$  es el poder calorífico de cada componente del combustible en  $kJ \cdot kg^{-1}$ .

### 3.2. Calentamiento

$$\Delta U = C_{p_c} \cdot m_4 \cdot x_{C4} \cdot (T_{llama} - T_{amb}) + C_{p_L} \cdot m_4 \cdot x_{L4} \cdot (T_{llama} - T_{amb}) + C_{p_w} \cdot m_4 \cdot x_{w4} \cdot (T_{llama} - T_{amb}) \quad (\text{ec. 4.7})$$

Donde  $C_p$  es el calor específico de cada componente del combustible en  $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $T_{llama}$  es la temperatura de llama de cada componente en  $K$  y  $T_{amb}$  es la temperatura del aire ambiente en  $K$ .

### 3.3. Energía total

$$E_T = E_T^c - \Delta U \quad (\text{ec. 4.8})$$

Donde  $\Delta U$  es la variación de energía interna por unidad de tiempo expresada en  $kJ \cdot h^{-1}$ .

## 4. Balance de Energía Total

$$h_3 = \frac{M'_{1+5} \cdot h_{1,5} + E_T}{M'_3} \quad (\text{ec 4.9})$$

Donde  $M'$  son los caudales másicos de aire seco de cada corriente expresados en  $kg_{as} \cdot h^{-1}$  y  $h_{1,5}$  es la entalpía del aire ambiente por unidad de masa de aire seco del aire ambiente expresada en  $kJ \cdot kg_{as}^{-1}$ .

## 5. Balance de Composición

$$M_{1+5} \cdot x_{i,1,5} \pm \sum G_i^j + m_4 \cdot x_{w4} = M_3 \cdot x_{i3} \quad (\text{ec 4.10})$$

Donde  $i$ :  $O_2$ ,  $CO_2$  y  $H_2O$ .

### 5.1. Balance de agua

$$M_{1+5} \cdot x_{w\ 1,5} + \sum G_w^j + m_4 \cdot x_{w\ 4} = M_3 \cdot x_{w\ 3} \quad (\text{ec 4.11})$$

Por último se realiza una iteración entre las entalpías obtenidas de los balances y la entalpía calculada a partir de la temperatura de secado (ver figura 4.8).

### 6. Iteración

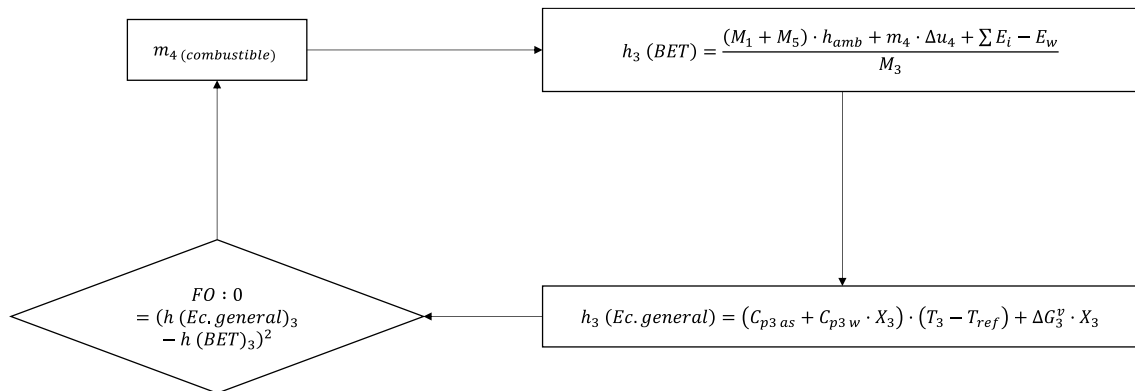


Figura 4.8. Diagrama de iteración para el cálculo del caudal de combustible de entrada al quemador.

En el caso de los combustibles fósiles el procedimiento es el mismo, en función de la tabla 4.3 teniendo en cuenta que todo el combustible combustiona (no tiene agua ni genera cenizas), y la reacción es única.

Una vez calculado el global, es posible realizar balances en la cámara de combustión teniendo en cuenta que se realizara hasta la temperatura de llama y que la corriente de aire no puede alcanzar una fracción volumétrica inferior al 5 % para preservar una correcta combustión.

En la tabla 4.4 se muestra la resolución para distintas temperaturas de secado y para dos combustibles fósiles y dos residuos lignocelulósicos.

Tabla 4.5. Resultado del modelo de sistematización del dimensionamiento de quemadores. Donde  $T^{\text{secado}}$  es la temperatura de secado,  $M_1$  ( $\text{kg}_{\text{ah}} \cdot \text{h}^{-1}$ ) es el caudal de entrada a la cámara de combustión,  $M_5$  ( $\text{kg}_{\text{ah}} \cdot \text{h}^{-1}$ ) es el caudal de entrada al mezclador,  $m_4$  ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ) es el caudal de combustible empleado,  $\text{CO}_2$  generado es la huella de carbono generada en la cámara de combustión y  $\varphi^{\text{secado}}$  es la humedad relativa de secado expresada en tanto por uno.

	$T^{\text{secado}}(^{\circ}\text{C})$	$M_1$	$M_5$	$m_4$	$\text{CO}_2^{\text{generado}}$	$\varphi^{\text{secado}}$
Cascarilla de arroz	300	44	53,81	3,23	3,13	0,0005
	200	25	73,69	1,93	1,87	0,0021
	100	10	89,55	0,66	0,64	0,0233
	80	6	93,72	0,41	0,40	0,0462
	60	2,5	97,39	0,17	0,16	0,1012
Cascarilla de nuez	300	43	55,04	1,98	3,18	0,0005
	200	27	71,83	1,18	1,90	0,0020
	100	9,9	89,70	0,41	0,65	0,0226
	80	6,5	93,25	0,25	0,41	0,0453
	60	2,5	97,40	0,10	0,17	0,1003
Gas Natural	300	36	63,56	0,54	1,47	0,0005
	200	22	77,74	0,32	0,88	0,0020
	100	7,6	92,31	0,11	0,30	0,0230
	80	4,8	95,14	0,07	0,19	0,0458
	60	2	97,98	0,03	0,08	0,1008
Diesel	300	45	54,45	0,68	2,13	0,0004
	200	26	73,67	0,40	1,27	0,0018
	100	9	90,89	0,14	0,44	0,0219
	80	6	93,93	0,09	0,27	0,0443
	60	2,3	97,67	0,04	0,11	0,0993

\* Tomando como valor del caudal de secado ( $100 \text{ kg}_{\text{ah}}/\text{h}$ ), una temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa del

Al observar los resultados obtenidos se puede ver como los residuos lignocelulósicos requieren mayor cantidad para alcanzar las mismas temperaturas que los combustibles fósiles, aunque teniendo en cuenta que el coste de estos últimos es mucho mayor, la diferencia entre ambos sigue beneficiando a los residuos. Esto es debido a que los calores latentes de combustión son mayores en los derivados del petróleo. Por esta razón, el dióxido de carbono generado en estos últimos es menor, siendo especialmente bajo en el gas natural, sin embargo este dióxido de carbono es de ciclo largo, incorporándose a la atmósfera en forma de incremento de la concentración media del planeta, el dióxido de carbono generado a partir de la combustión de los residuos vegetales pertenece al ciclo corto, formando parte del ciclo medioambiental respiratorio de las plantas.

En cuanto al reparto de los caudales de aire de entrada, la relación es importante ya que indica la dificultad de control de temperatura puesto que cuanto más desequilibrio existe entre estos caudales más complejo es el control de temperatura de secado. Sería previsible pensar que este desequilibrio sería mayor en los combustibles fósiles ya que su temperatura de llama es mucho mayor, sin embargo los valores mostrados se mantienen en el mismo orden que los residuos lignocelulósicos.

El aire caliente producido en el quemador mantiene unas características similares para los procesos de deshidratación. Esto se puede observar en la columna de humedades relativas, propiedad termodinámica con más peso en el potencial químico del agua en los procesos de secado por aire caliente.

En los procesos de combustión el proceso de rehidratación del aire es dependiente de la estequiometría de la reacción. Una posibilidad para reducir esta humidificación son los procesos de secado combinado, donde el aire es calentado o deshumidificado previamente mediante técnicas que no se basen en la combustión como es el calentamiento por resistencias eléctricas o mediante condensadores barométricos, o bien mediante la adición de energía durante el propio proceso de secado, como es el caso del secado combinado de aire caliente con microondas o infrarrojos.

En las figuras 4.9 a 4.12 se muestran los procesos de calentamiento por combustión y mezcla de aire hasta la temperatura de secado (200 °C) comparándolos con procesos de calentamiento basados en el aporte de energía sin aporte de agua. Para mejorar la comprensión del proceso se han graficado sobre un diagrama psicrométrico de Mollier adaptado a las temperaturas de llama de cada uno de los combustibles.

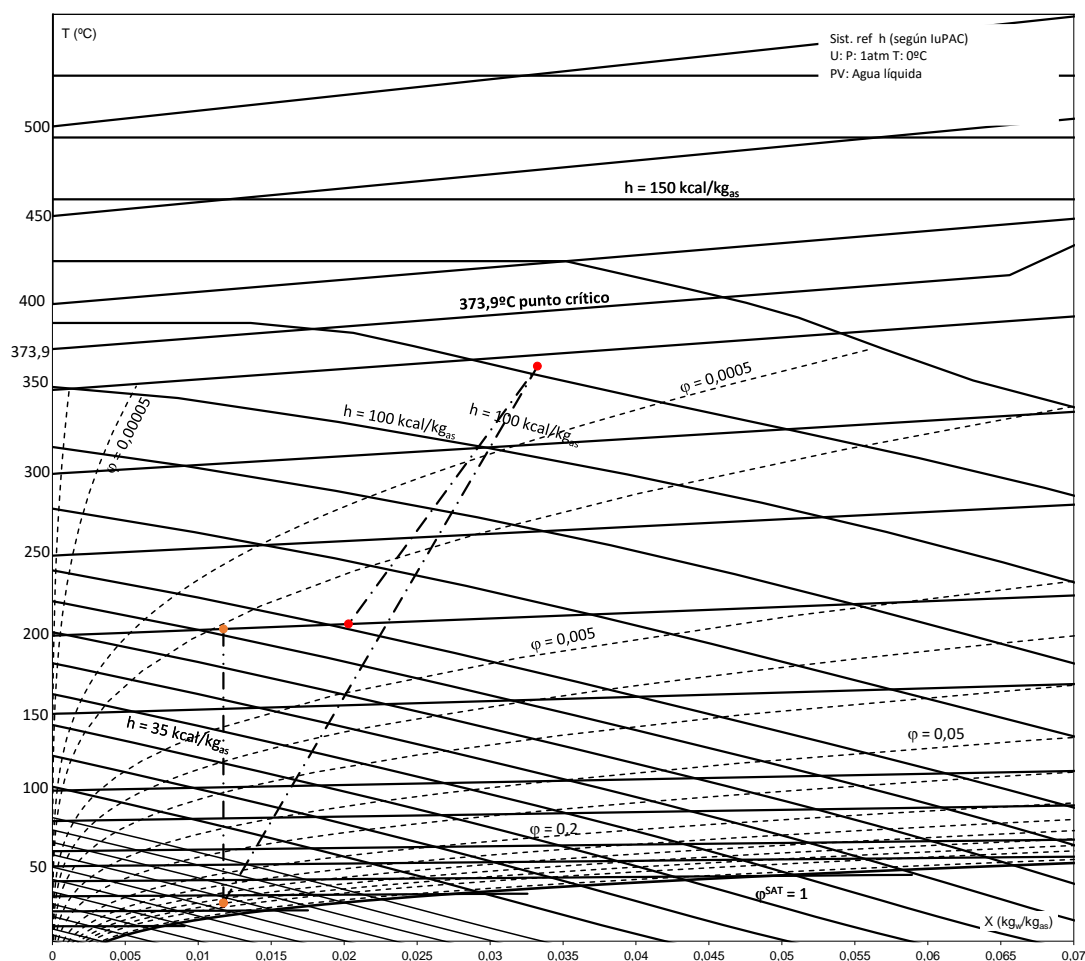


Figura 4.9. Representación del proceso de combustión y mezcla de una corriente de aire desde 25 °C de condiciones ambientales, para llegar a una temperatura de 200 °C, mediante la

combustión de cáscara de arroz, mostrando el mismo proceso pero sin combustión y con el calentamiento eléctrico (sin humidificación).

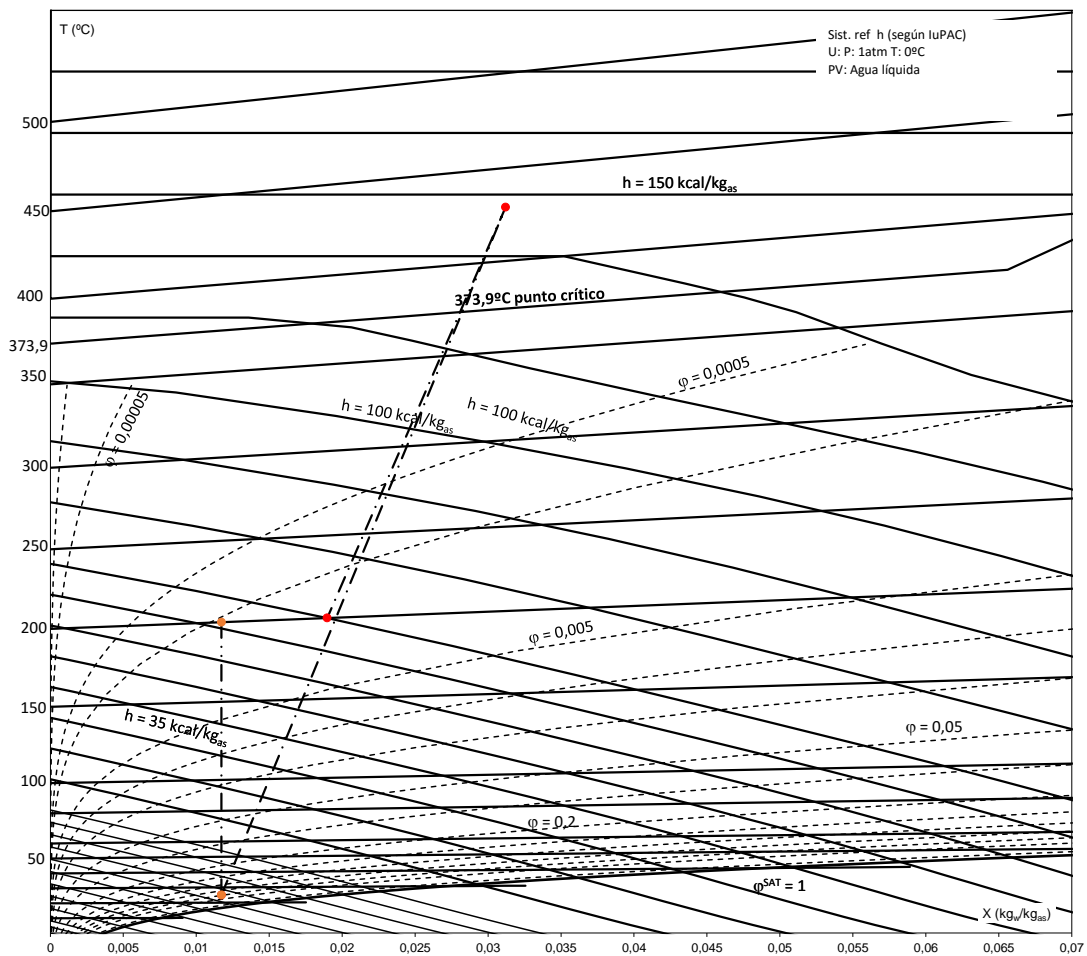


Figura 4.10. Representación del proceso de combustión y mezcla de una corriente de aire desde  $25^\circ\text{C}$  de condiciones ambientales, para llegar a una temperatura de  $200^\circ\text{C}$ , mediante la combustión de cáscara de arroz, mostrando el mismo proceso pero sin combustión y con el calentamiento eléctrico (sin humidificación).

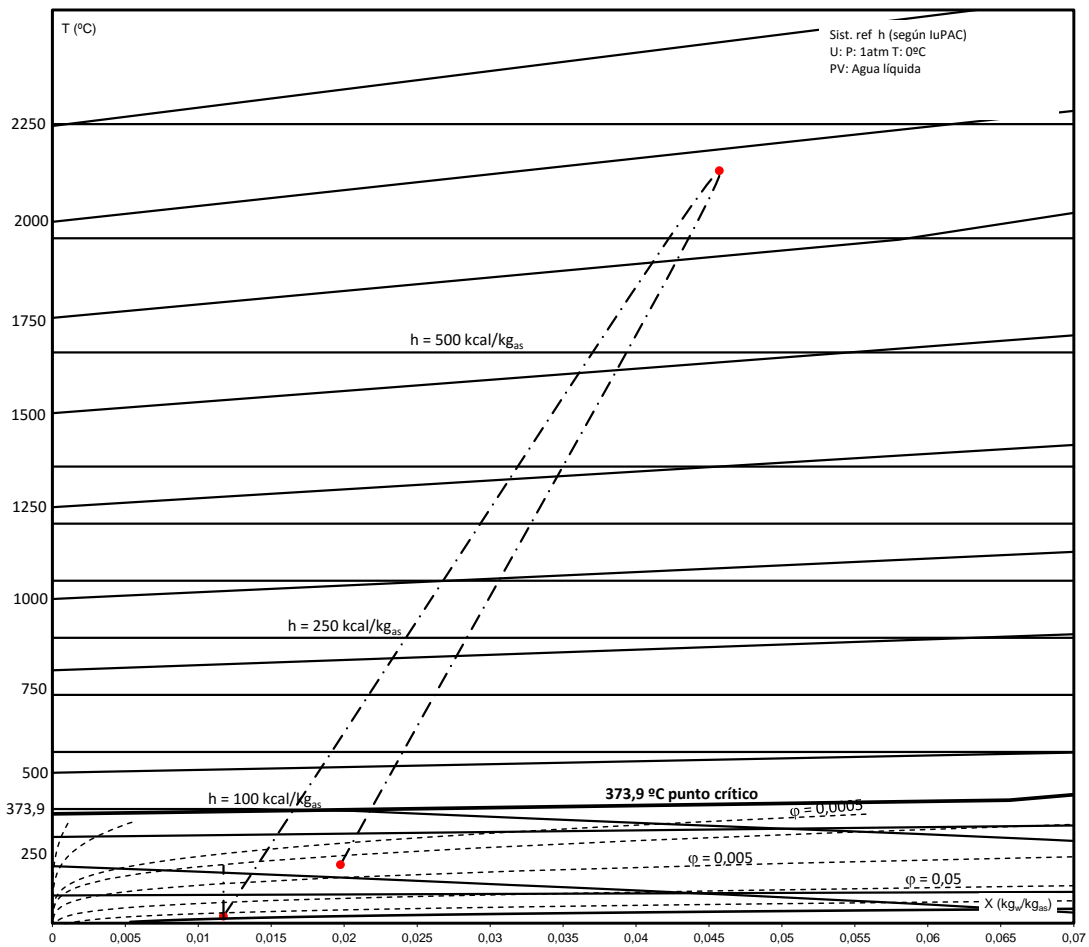


Figura 4.11. Representación del proceso de combustión y mezcla de una corriente de aire desde 25 °C de condiciones ambientales, para llegar a una temperatura de 200 °C, mediante la combustión de gas natural, mostrando el mismo proceso pero sin combustión y con el calentamiento eléctrico (sin humidificación).

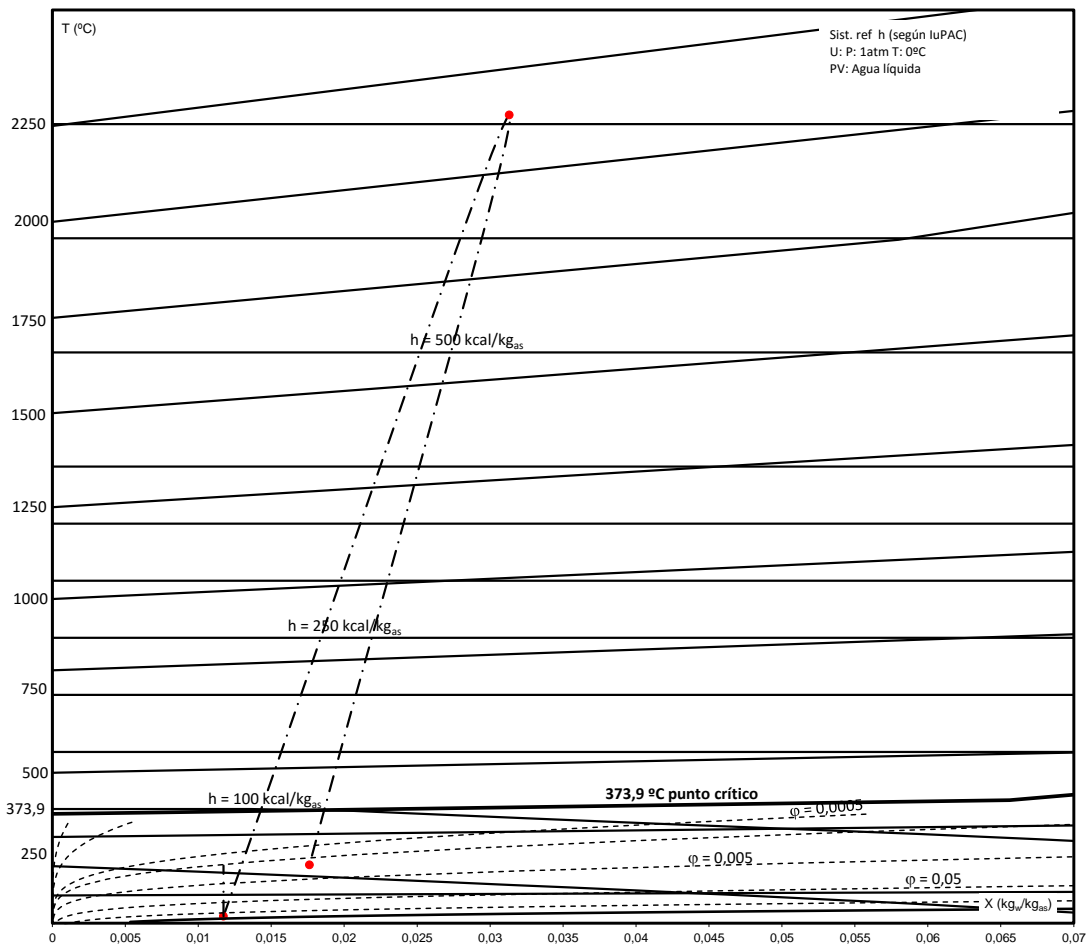


Figura 4.12. Representación del proceso de combustión y mezcla de una corriente de aire desde 25 °C de condiciones ambientales, para llegar a una temperatura de 200 °C, mediante la combustión de diésel, mostrando el mismo proceso pero sin combustión y con el calentamiento eléctrico (sin humidificación).

Como se observa al comparar las ultimas 4 figuras, las temperaturas de llama y el elevado calor latente de combustión de los combustibles fósiles provocan un menor cambio composicional del aire de secado. La comparativa entre el procedimiento de combustión y mezcla frente a calentamientos no procedentes de la combustión alcanzan temperaturas menores, reduciendo riesgos en las instalaciones y mejorando el sistema de control de temperatura.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método de medida de la temperatura de llama para residuos lignocelulósicos basado en la espectrometría infrarroja. Mediante esta técnica ha sido posible realizar un monitoreo del proceso de combustión.

El procedimiento sistemático de modelización de quemadores mediante la simplificación del balance global ha sido demostrado y aplicado en distintas condiciones de producción de aire de secado y para distintos combustibles.

Se ha realizado un trabajo de compilación de información que acoplado a la metodología expuesta en el trabajo permite desarrollar el modelo de dimensionado para distintos combustibles, de origen vegetal o fósil.

Ha sido posible comparar la utilización de combustibles obtenidos a partir de residuos lignocelulósicos con combustibles derivados del petróleo.

De la comparativa entre los dos grupos de combustibles se ha concluido que los residuos lignocelulósicos requieren mayor cantidad para alcanzar las mismas temperaturas de secado que los combustibles fósiles, aunque teniendo en cuenta el coste de estos últimos, la diferencia entre ambos sigue beneficiando a los residuos.

Respecto al impacto medioambiental, el dióxido de carbono generado en los combustibles fósiles es menor, siendo especialmente bajo en el gas natural, sin embargo este dióxido de carbono es de ciclo largo, incorporándose a la atmósfera en forma de incremento de la concentración media del planeta, el dióxido de carbono generado a partir de la combustión de los residuos vegetales pertenece al ciclo corto, formando parte de la ciclo medioambiental respiratorio de las plantas.

En cuanto a las inercias termodinámicas conseguidas en el aire de secado el aire caliente producido en el quemador mantiene unas características similares sin existir diferencias significativas entre ellas.

Por último al comparar los procesos de combustión para modificar las condiciones del aire respecto a otras técnicas de calentamiento se observa que las temperaturas de combustión alcanzadas en los residuos vegetales están en valores que generan riesgos de seguridad en la planta (400 °C aproximadamente) sin embargo, en el caso de los combustibles fósiles las temperaturas son mucho mayores (2000 °C). De tal manera que se concluye que es conveniente, tanto para la seguridad de las instalaciones de secado, como para el coste del proceso como para el impacto medio ambiental (huella de carbono) es necesario abrir la posibilidad a técnicas combinadas de secado. Como por ejemplo agregar aire es calentado o deshumidificado previamente mediante técnicas que no se basen en la combustión como es el calentamiento por resistencias eléctricas o mediante condensadores barométricos, o bien mediante la adición de energía durante el propio proceso de secado, como es el caso del secado combinado de aire caliente con microondas o infrarrojos.



## 6. BIBLIOGRAFIA

ÁLVAREZ A., PIZARRO C., FOLGUERAS M.B., 2013, "Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico". Departamento de energía, Universidad de Oviedo. 12 pp.

BAKER A., BARNES W.L., SMART P.L., 1997, "Hydrological Processes". *Journal of Hydrology*. 11 (11): 1541-1555.

BARBOSA-CÁNOVAS G.V., VEGA-MERCADO H., 1996, "Dehydration of Foods". Ed: Springer Science & Business Media. 330 pp.

BERKOWITZ D.E. "Food processing sectors". Encyclopaedia of occupational health and safety, Chapter 67: Food industry, 2012. Ed: J.M. Stellman, International Labour office, Ginebra, Suiza.

CASTRO-GIRÁLDEZ M., BALAGUER N., HINAREJOS E., FITO P. J, 2014, "Thermodynamic approach of meat freezing process". *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 23 (0): 138-145.

CUERVO L., FOLCH J.L., QUIROZ R.E., 2009, "Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol". *Biotecnología y bioingeniería A.C.* 13 (3): 11-25.

FAO, 2016, "Seguimiento del mercado del arroz", Informe Abril 2016, RICE MARKET NETWORK.

FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2013, "Nuts: production".

GREEN D., PERRY R., 2007, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", Eighth Edition. Ed: McGraw-Hill Education. New York (USA). 2585 pp.

HAYNES W.M., Junio 2015, "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 96th Edition. p. 15-51. Ed: CRC Press.

LABUZA T. P., ALTUNAKAR B., 2007, "Water Activity Prediction and Moisture Sorption Isotherms in Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications". Vol. 109-154. G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana, S. J. Schmidt, and T. P. Labuza. Ed: IFT Press and Blackwell Publishing, Iowa, USA.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, Informe abril 2015 versión 2, Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST), 2016, "Base de Datos de Referencia Estándar del NIST". Número 69.

REED R.J., 1978, "North American Combustion Handbook", Second Edition. Ed: North American Manufacturing. 332 pp.

TALENS C., 2015, "Desarrollo de técnicas combinadas de secado con aire caliente y microondas en la producción de fibra alimentaria a partir de subproductos cítricos". Ed: Sin editorial. Valencia, España. 323 pp.

TRAFFANO-SCHIFFO M.V., CASTRO-GIRÁLDEZ M., FITO P.J., BALAGUER N., 2014, "Thermodynamic model of meat drying by infrared thermography". *J. Food Eng.* 128 (0): 103-110.

TREYBAL R.E., 1980, "Mass-Transfer Operations", Third Edition. Ed: McGraw-Hill. Singapur. 798pp.

VALVERDE A., SARRIA B., MONTEAGUDO J.P., 2007, "Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la Cascarilla de arroz". *Scientia et Technica*. Vol. 1-37 (0).

ZLOCHOWER I. A., GREEN G. M, 2009, "The limiting oxygen concentration and flammability limits of gases and gas mixtures". *Journal of loss prevention in the process industries*, 22(4), 499-505.

## 7. ANEXOS

A continuación se muestran los experimentales

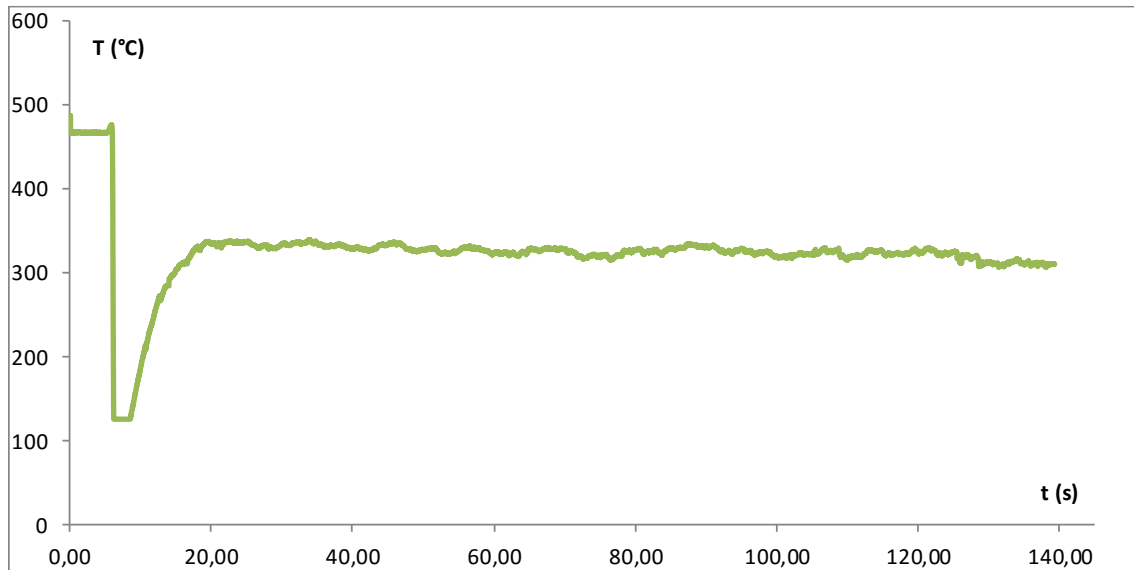


Figura 7.1. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de la muestra 2 de cascarilla de arroz.

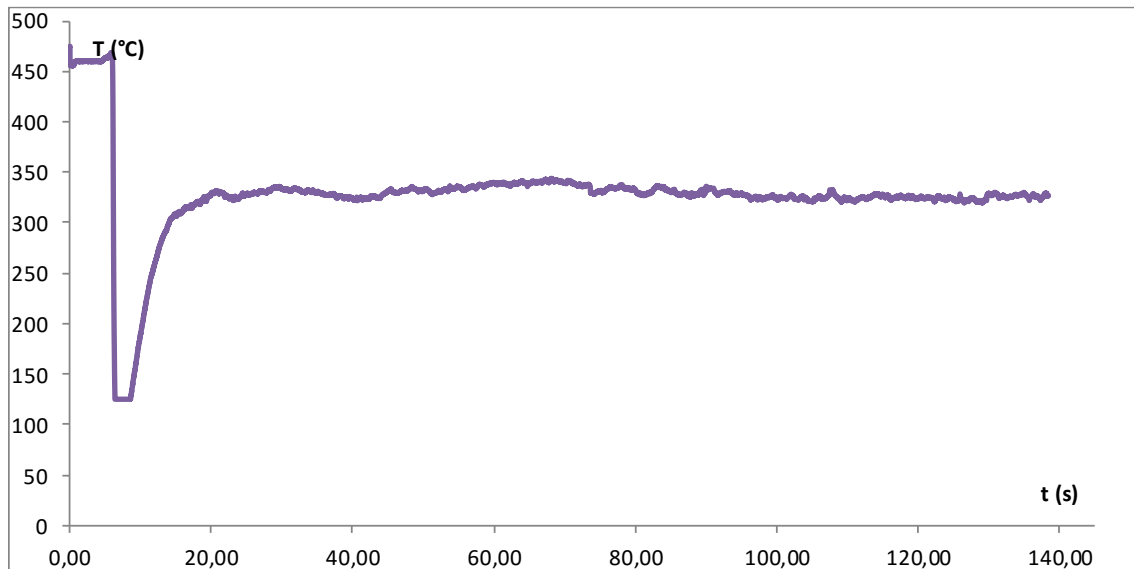


Figura 7.2. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de la muestra 3 de cascarilla de arroz.

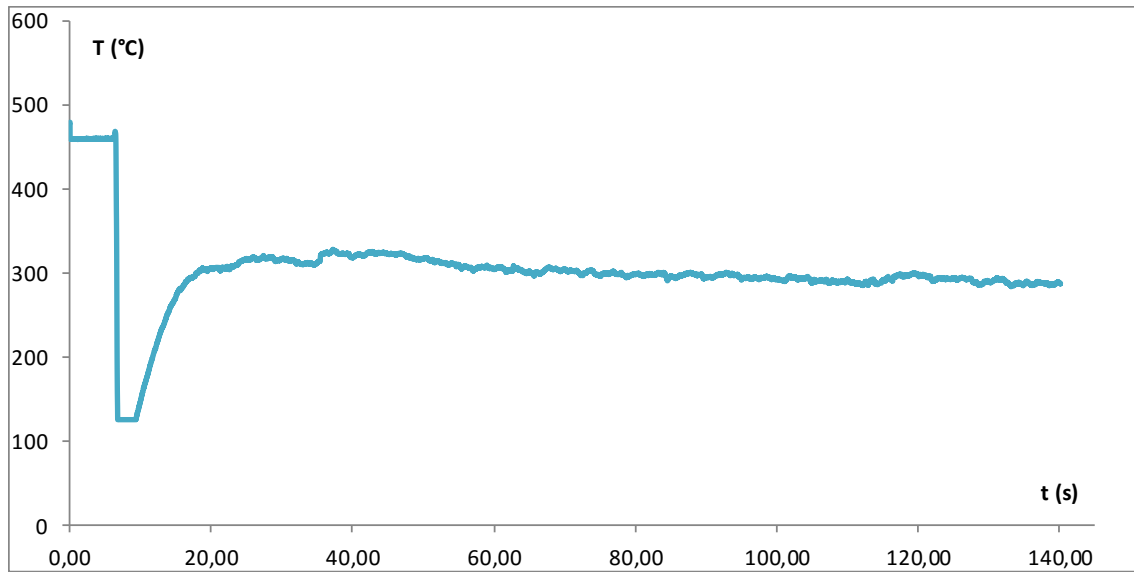


Figura 7.3. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de la muestra 4 de cascarilla de arroz.

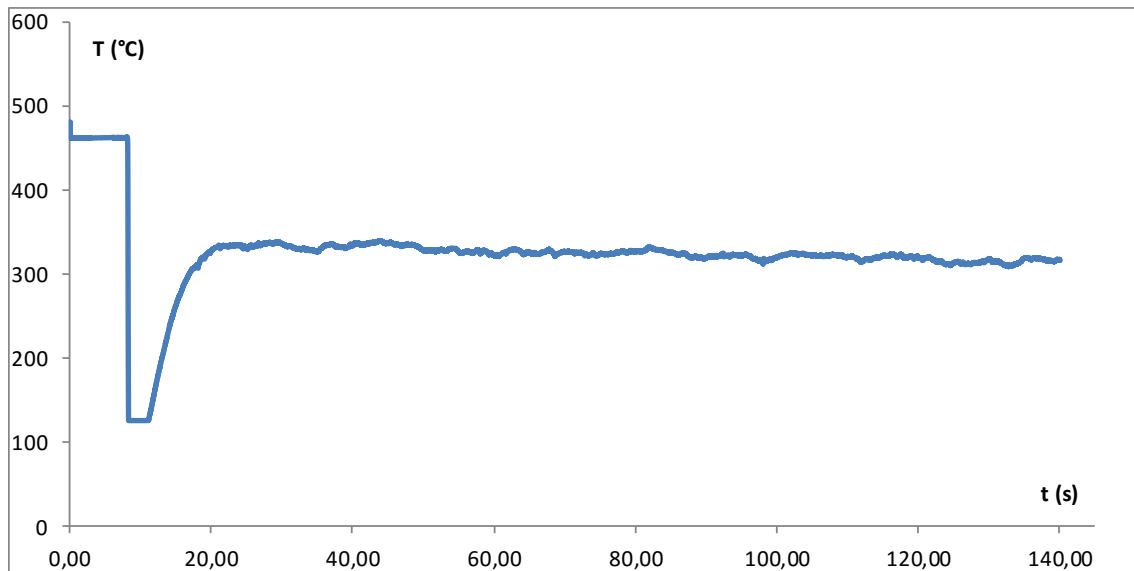


Figura 7.4. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de la muestra 5 de cascarilla de arroz.

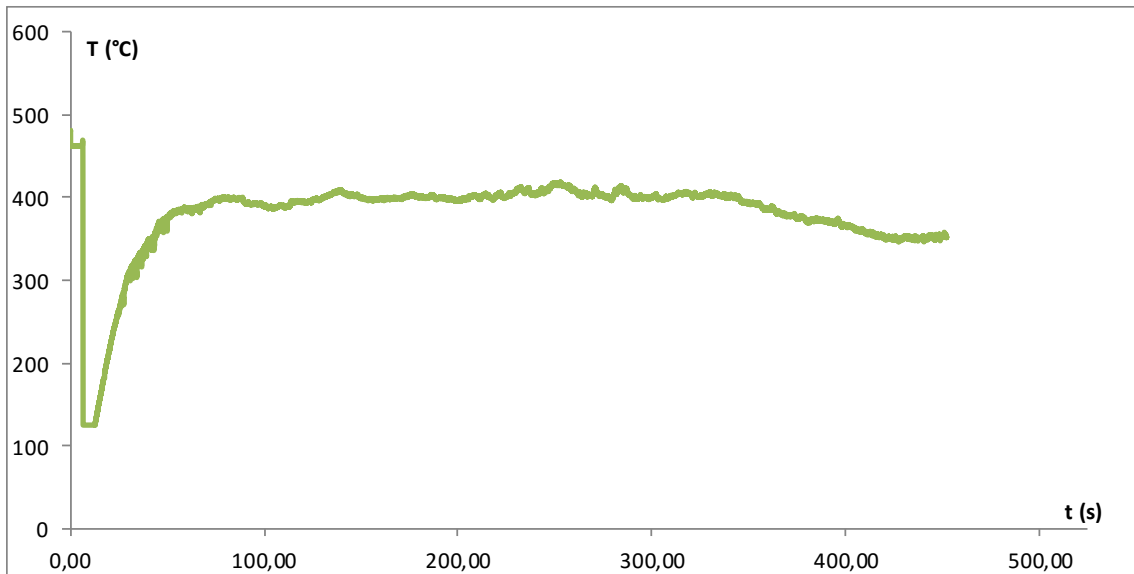


Figura 7.5. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de la muestra 3 de cáscara de nuez.

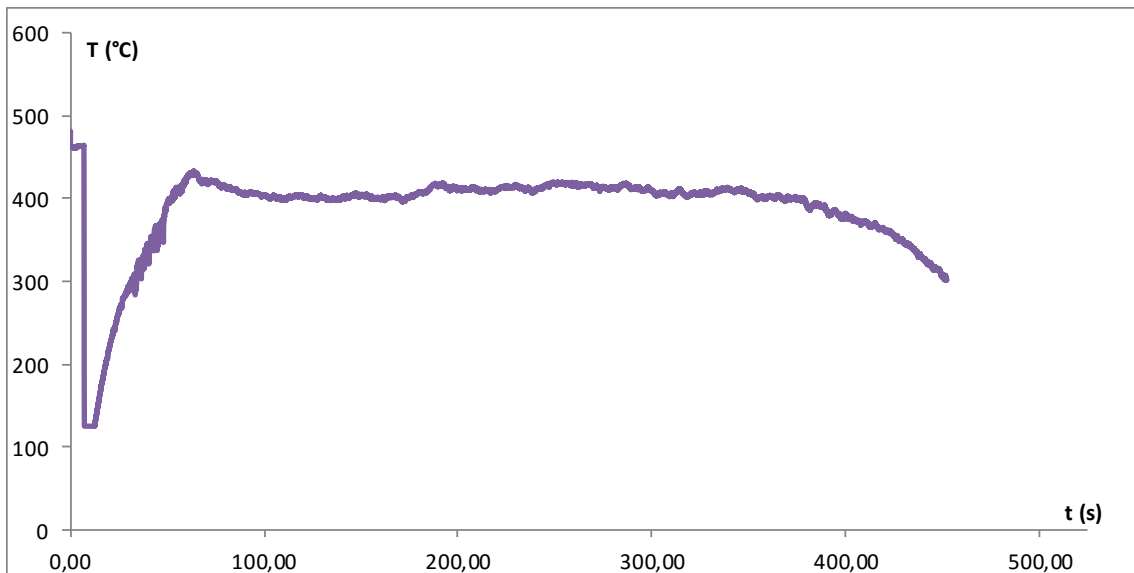


Figura 7.6. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de la muestra 4 de cáscara de nuez.

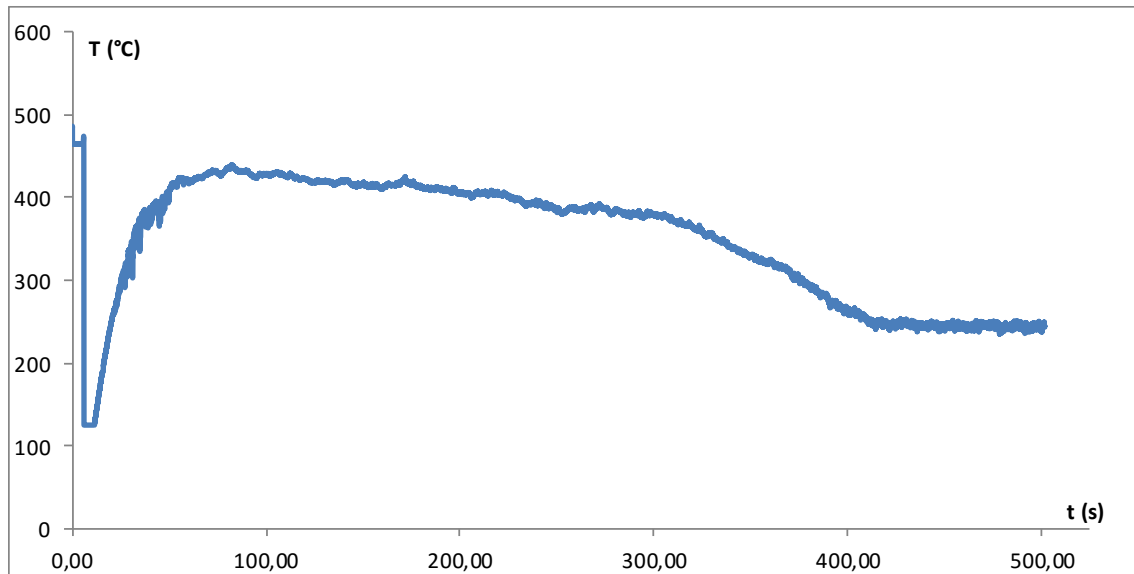


Figura 7.7. Representación de los datos experimentales de temperatura respecto al tiempo de la muestra 5 de de cáscara de nuez.