



# OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE UN SECADERO INDUSTRIAL

PROYECTO FINAL DE CARRERA

CURSO ACADÉMICO 2010-2011



Autora: Nuria Galán Lacarra

Director: José María Marín.

Titulación: Ingeniería Industrial Superior.

Mención: Energía y Tecnología de Calor y Fluidos.

Fecha: 13-04-2011

Centro Politécnico Superior

Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.

# RESUMEN

El objetivo del presente Proyecto Final de Carrera es la optimización energética de un secadero industrial para el secado y tostado de avellanas, reduciendo al mínimo su consumo energético sin alterar las características finales del producto.

La primera parte consiste en una revisión de la bibliografía del secado de sólidos y artículos científicos del secado y tostado de alimentos. Se realiza un estudio de la fenomenología del secado, mediante la realización de los balances de energía y materia y el estudio de la cinética de los fenómenos de transporte de calor y materia. Mediante este estudio se obtiene un sistema de ecuaciones y un algoritmo de cálculo que controla la evolución de las variables termodinámicas durante el proceso. El algoritmo se resuelve en el programa Engineering Equation Solver (EES) y se aplica al caso concreto de las avellanas.

En segundo lugar, se utiliza el programa diseñado para realizar un estudio paramétrico de las variables termodinámicas que influyen en el proceso y un estudio de la influencia de las dimensiones del secadero en dichas variables. Mediante este estudio se obtienen los valores óptimos de las variables termodinámicas, maximizando la eficiencia energética del secadero. Se analiza el comportamiento de las avellanas y el aire durante el proceso para los valores óptimos.

Finalmente, se propone como medida de ahorro energética la instalación de un intercambiador. Se diseña el intercambiador mediante el método NTU- $\epsilon$  y su implementación en el programa EES y se estudia su rentabilidad económica.

# TABLA DE CONTENIDOS:

<b>0. INTRODUCCIÓN Y PRESENTACION DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
<b>1. FEMENOMENOLOGÍA Y CINETICA DEL SECADO.....</b>	<b>3</b>
1.1 Conceptos fundamentales.....	4
1.2 Modelos matemáticos.....	8
1.3 Estudio del proceso de secado.....	9
1.4 Gasto energético.....	14
<b>2. OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Temperatura del aire.....	18
2.2 Velocidad del aire.....	23
2.3 Longitud del horno.....	25
2.4 Área transversal.....	28
<b>3. APLICACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN DEL CASO BASE.....</b>	<b>31</b>
3.1 Estudio del caso base.....	31
3.2 Estudio del caso óptimo.....	33
<b>4. INSTALACIÓN MEJORA ENERGÉTICA.....</b>	<b>37</b>
4.1 Diseño del intercambiador.....	37
4.2 Aplicación en el caso óptimo.....	40
4.3 Conclusiones.....	41
<b>ANEXOS</b>	
<b>Anexo I:</b> Algoritmo optimización secadero.....	42
<b>Anexo II:</b> Algoritmo diseño intercambiador.....	49
<b>Anexo III:</b> Optimización del tiempo.....	53
<b>Anexo IV:</b> Optimización de la velocidad.....	63
<b>Anexo V:</b> Optimización de la longitud.....	69
<b>Anexo VI:</b> Artículo.....	77
<b>Anexo VII:</b> Artículo.....	87
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>101</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>103</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>105</b>

# CAPÍTULO 0

## Introducción y objetivos del proyecto fin de carrera.

---

El secado es uno de los procesos térmicos más habituales, siendo necesaria la reducción de humedad en diversos materiales para su almacenamiento, transporte y conservación. El exceso de humedad contenida puede eliminarse por métodos mecánicos (sedimentación, filtración, centrifugación). Sin embargo, la eliminación más completa de la humedad se obtiene por evaporación y eliminación de los vapores formados, es decir, mediante el secado térmico, ya sea empleando una corriente gaseosa o sin la ayuda del gas para extraer el vapor.

La eliminación de agua o en general de líquidos existentes en sólidos es más económica por acción mecánica que por acción térmica. La dificultad de los medios mecánicos surge cuando los productos finales y gran número de productos intermedios deben cumplir especificaciones rigurosas en cuanto a la humedad final. Habitualmente una centrifugadora trabajando con grandes cargas de sólido húmedo dejara humedades en torno al 10-20%.

En los productos alimenticios, la humedad final exigida es muy baja, y el proceso de secado es delicado debido a la importancia de conservación de sus nutrientes. El secado y tostado mediante aire caliente es la técnica más común en el sector alimenticio de los frutos secos. Para incrementar la calidad de los productos, es necesario entender los cambios físicos, bioquímicos, y microbiológicos que tienen lugar el proceso. El tostado de alimentos depende de la transferencia de calor y masa entre el aire y el producto. Un conocimiento de la distribución y evolución de la temperatura y humedad en el producto es vital para el diseño del equipo, el control de calidad y la elección de la forma de almacenamiento apropiada.

En este proyecto se plantea la optimización de un secadero industrial mediante la circulación de aire caliente a través de un lecho, y se desarrolla para el caso concreto de que el producto a secar sean las avellanas; siendo las avellanas el segundo fruto seco de mayor importancia económica. El principal fabricante es Turquía, con 600000 toneladas de avellanas al año, seguido de Italia, Estados Unidos y España. Las avellanas son consumidas frescas y tostadas, son uno de los principales aportes en la fabricación de chocolate, repostería, bebidas, helados, cremas... y sus cáscaras son cada vez más utilizadas como combustible en la industria de la biomasa.

Para llevar a cabo la optimización del secadero, es necesario un análisis detallado de la fenomenología de secado y tostado mediante aire caliente; y un estudio general del secado en diferentes productos alimenticios; en base a este estudio, se diseña un algoritmo que controla la evolución de las variables implicadas en el proceso de secado, este algoritmo es implementado con el programa EES para el caso concreto de las avellanas. Mediante este algoritmo se puede realizar un análisis de la influencia de las variables, y un estudio paramétrico de ellas, mediante la observación de cómo influyen en el proceso y con los resultados obtenidos se consigue optimizar energéticamente y reducir el consumo de energía de un secadero de avellanas.

Para completar la optimización, se estudia una medida de mejora energética, la instalación de un intercambiador de calor. Se realiza el diseño del intercambiador y se calcula su rentabilidad económica.

Para finalizar la introducción se presenta de manera breve la estructura de este Proyecto Final de Carrera, y los aspectos que comentamos a continuación:

En el **capítulo 1** (*fenomenología y cinética del secado*) se expone un resumen del estudio previo realizado, y la base de las ecuaciones con las que se ha diseñado el algoritmo de simulación del comportamiento del aire y el producto en el interior del secadero y los cálculos energéticos.

En el **capítulo 2** (*Optimización energética*) se estudia la influencia de las variables en el proceso de optimización y se explica fase a fase la optimización realizada y los resultados obtenidos en cada fase de la optimización.

En el **capítulo 3** (*Aplicación de la optimización del caso base*) se analizan los resultados obtenidos en el caso óptimo, y la evolución de las variables más importantes en el proceso de secado y tostado.

En último lugar, en el **capítulo 4** (*Medida energética*) se explica cómo se ha diseñado el intercambiador, las ecuaciones utilizadas para la implementación del algoritmo de diseño, el intercambiador seleccionado, y finalmente los cálculos y resultados de ahorro energético y económico.

En lo referente a los **anexos** es preciso mencionar que se ha incluido el algoritmo de cálculo utilizado en la optimización del secadero (*anexo I*), el algoritmo de diseño del intercambiador (*anexo II*), los resultados obtenidos para realizar cada fase de la optimización (*anexo III, anexo IV, anexo V*), Y dos artículos básicos para facilitar la comprensión del trabajo realizado (*anexo VI, anexo VII*).

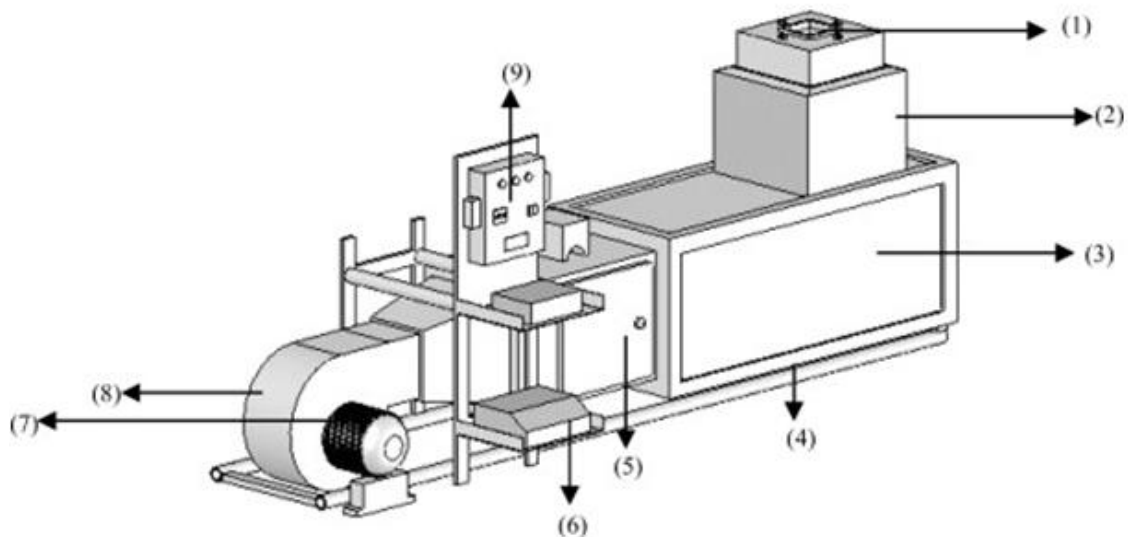
La **bibliografía, nomenclatura y glosario** se encuentran en las últimas páginas del proyecto.

# CAPÍTULO 1

## Fenomenología y cinética del secado

El producto a secar se coloca en un lecho prismático formado por partículas, cuya geometría depende del producto a secar. En este proyecto se estudia el secado de avellanas, su geometría se aproxima a una esfera. A través del lecho se hace circular aire caliente y poco húmedo que cede calor por convección al lecho y recoge la humedad evaporada del alimento.

El producto contiene agua en su interior, que está vinculada de dos maneras distintas a las moléculas de material; una parte del agua se mantiene ligada al producto y se denomina humedad de equilibrio y el resto se encuentra en estado prácticamente libre y es la que se va extraer en el proceso de secado. La humedad del material, se define habitualmente como  $M = m_{\text{agua}}/m_{\text{producto, seco}}$ , y se mide en kilogramos de agua por kilogramos de producto seco.



- (1) Salida de aire, (2) sensor, (3) cámara de secado, (4) base, (5) calentador, (6) inverter  
(7) electromotor, (8) ventilador, (9) control automático.

Figura 1: Diagrama esquemático del secadero

## 1.1 Conceptos fundamentales

### 1.1.1 Humedad de equilibrio.

La humedad de equilibrio,  $m_e$ , es la que alcanza un material cualquiera cuando se encuentra en equilibrio termodinámico con el aire que le rodea. La velocidad a la que sale el agua libre del material y se evapora hacia el aire depende del ritmo al que se difunde el agua desde el interior del producto hasta su superficie y de la diferencia entre la humedad presente en el producto a secar y su humedad de equilibrio.

La humedad de equilibrio propia de un material está directamente relacionada con la humedad relativa y temperatura del aire, por lo tanto variará según las condiciones del aire y del producto a secar, para el caso concreto de las avellanas su humedad de equilibrio, para el rango de temperaturas y humedad del aire que entra en el secadero, es de cero kilogramos de agua por kilogramo de producto seco.

Si el lecho se pone en contacto con aire húmedo, siendo la presión parcial del vapor sobre la superficie del material superior a su presión parcial vapor en el aire entonces se producirá una migración del vapor hacia el aire y el sólido disminuirá su humedad, hasta llegar a la humedad de equilibrio donde la presión de vapor en la superficie del sólido se iguala con la presión de vapor en el aire. Por el contrario si el aire utilizado en el proceso tuviese una presión de vapor mayor que la presión de vapor en la superficie del sólido, entonces el sólido absorbería el vapor de agua contenido en el aire y aumentaría su humedad.

**Tabla 1: Influencia de la presión de vapor en el proceso.**

$P_{\text{vapor}}(\text{sólido}) > P_{\text{vapor}}(\text{aire})$	Sólido disminuye su humedad, proceso de secado
$P_{\text{vapor}}(\text{sólido}) = P_{\text{vapor}}(\text{aire})$	Equilibrio
$P_{\text{vapor}}(\text{sólido}) < P_{\text{vapor}}(\text{aire})$	Sólido aumenta su humedad, proceso de humectación

### 1.1.2 Velocidad de secado

La velocidad de secado experimental puede determinarse mediante el secado y el análisis de una muestra de producto, a partir de los datos obtenidos se puede dibujar una curva que representa la velocidad de secado. La velocidad de secado se define como la variación de humedad específica entre la variación de tiempo. Se calcula según la ecuación (1) y se determina tomando muestras y pesándolas a lo largo del tiempo.

$$\dot{M}_{\text{producto}} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}}}{m_{\text{producto}}}$$

**Ecuación 1**

En la grafica de secado representamos en la ordenada la masa de humedad evaporada en función de la masa de producto seco, y en el eje de coordenadas el tiempo.

### 1.1.3 Difusión de la humedad en el producto:

En el proceso de secado de sólidos por evaporación del líquido en su superficie, mediante circulación de aire caliente se distinguen tres etapas diferentes del proceso (*Artículo: Albert B.Newman*)

- Periodo constante de secado, durante el cual la superficie permanece completamente húmeda, y la tasa evaporación es la misma que el líquido en la superficie.
- Periodo de decrecimiento, en el cual decrece la superficie húmeda en el sólido, y la tasa de evaporación es directamente proporcional a la superficie húmeda del sólido. La tasa decrece con la concentración del líquido en el producto, hasta que la concentración del líquido en la superficie ha alcanzado el equilibrio con el aire, y no es posible disminuir la concentración en la capa superficial del sólido.
- Un segundo periodo de decrecimiento, durante el cual el líquido es evaporado de la superficie del sólido a la vez que tiene lugar la difusión en el interior del producto, Durante este periodo la concentración del líquido en la superficie del sólido permanece constante.

En el caso de las avellanas, el proceso de secado tiene lugar en el segundo periodo de decrecimiento, y por lo tanto es controlado por la difusión del líquido en el producto. Trabajando en esta etapa del proceso se asume

- a) que la concentración de líquido en el interior del producto es uniforme al comenzar el proceso.
- b) que la evaporación tiene lugar en la superficie del líquido y su resistencia a la evaporación es despreciable.

La humedad de líquido no ligado en el sólido es definida como la humedad total de líquido menos la humedad de equilibrio, y la tasa de humedad en el producto es:

$$MR \equiv \frac{M_i(r, t) - M_e}{M_o - M_e}$$

Ecuación 2

Donde  $M_i(r, t)$  es la humedad en cualquier instante de tiempo, en cualquier punto del interior del sólido,  $M_o$  es la humedad inicial y  $M_e$  la humedad de equilibrio. Mediante la aplicación de la Ley de Fick de transferencia de materia:

$$G = -D \nabla c$$

Ecuación 3



Donde  $G$  es el flujo de agua en el sólido ( $\text{kg/s m}^2$ ),  $D$  la difusividad de agua en el producto ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) y  $c$  la concentración de agua en el sólido ( $\text{kg/m}^3$ ), y mediante un balance de agua en un elemento diferencial de volumen ( $dv$ ), se obtiene una ecuación diferencial en derivadas parciales que describe la humedad en el producto para cada instante y posición

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right)$$

Ecuación 4

La solución de dicha ecuación diferencial con las siguientes condiciones de contorno:

$$1) \quad M(r = R, t) = M_e$$

$$2) \quad \frac{\partial M}{\partial r}(r=0) = 0 \text{ (por simetría)}$$

$$3) \quad M(r, t = 0) = M_o$$

Viene dada por:

$$\frac{M_i(r, t) - M_e}{M_o - M_e} = \frac{2R}{\pi r} \left( \sin \frac{\pi r}{R} \exp \left( -kt \left( \frac{\pi}{R} \right)^2 \right) - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi r}{R} \exp \left( -4kt \left( \frac{\pi}{R} \right)^2 \right) + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi r}{R} \exp \left( -9kt \left( \frac{\pi}{R} \right)^2 \right) \dots \right)$$

Ecuación 5

Esta ecuación da la humedad en cada instante y para cualquier posición. La humedad total que contiene el sólido es el valor importante, el que informa de cuanto ha sido secado el producto. Integrando la humedad en función del volumen se obtiene la humedad total contenida en el producto.

$$M_i(t) = \frac{1}{m_{\text{grano}}} \int_0^R M_i(r, t) \rho_s dV$$

Ecuación 6

Integrando la solución analítica se obtiene:

$$MR = \frac{M_i(t) - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{\left(\frac{-n^2 D \pi^2}{R^2} t\right)}$$

Ecuación 7

El efecto de la temperatura en la difusividad es descrito por la ecuación de Arrhenius:

$$D = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_{aire}}\right)$$

Ecuación 8

Siendo  $E_a$  la energía de activación, una propiedad característica de cada producto, toma valores entre los 1000 kJ/kg, y 2500 kJ/kg, en el caso de las avellanas su valor es 1891.6 kJ/kg.  $D_o$  una constante, equivalente a una difusividad a temperaturas infinitamente altas,  $R_g$  la constante de los gases ideales y  $T_{aire}$  la temperatura absoluta del aire en Kelvin

En este modelo se considera que:

- La temperatura no es una función radial de posición en el grano, por lo tanto no existe gradiente de temperatura en el grano, aunque si una variación temporal, debido a que el número de Biot es menor de uno, esto se trata en el apartado xx.
- La humedad en el grano sí es una función radial de posición, tal y como se ha comentado más arriba y se demuestra por tener un alto número de Biot, calculamos el número de Biot por analogía entre el transporte de calor y materia:

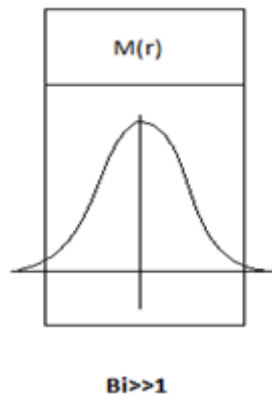
$$h_m = \frac{h}{\rho c_p} = \frac{80 \frac{W}{m^2 K}}{\frac{10^3 J}{m^3 K}} = 8 \cdot 10^{-2} \frac{m}{s}$$

Ecuación 9

$$Bi_M = \frac{h_M R}{3D} = \frac{8 \cdot 10^{-2} \frac{m}{s} \cdot 10^{-2} m}{3 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}} = 266 \gg 1$$

Ecuación 10

Queda demostrado que la humedad en la avellana es función de la posición y el tiempo:



**Figura 2: Perfil de humedad en la avellana en el instante t.**

La difusión, depende del producto y de las condiciones del aire en el proceso, en general aumenta su valor cuando incrementa la temperatura del aire, y disminuye su valor cuando desciende la velocidad del aire. En el caso de las avellanas, el efecto de la velocidad del aire en la difusión es insignificante comparado con el efecto de la temperatura del aire. Se consideran unos valores de difusividad validos entre  $2.301 \cdot 10^{-7}$  a  $11.759 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ , que se dan en un rango de temperaturas del aire entre 100 y 160 °C. (Articulo de referencia: Murat Ozdemir, Y.Onuer Devres, 1999).

### **1.2 Modelos matemáticos, variación de humedad en el producto:**

Diferentes modelos matemáticos describen el proceso de difusión y variación de humedad en el sólido, clasificados en tres categorías: teóricos, semi-empíricos y empíricos. Las investigaciones teóricas describen cualitativamente el proceso, basándose en la ley de difusión de Fick y el coeficiente de Arrhenius, dependiente de la temperatura y sirven de fundamento a los modelos semi-empíricos que incorporan medidas experimentales para calcular con mayor precisión los coeficientes que dan la evolución temporal de la humedad en el producto validos para unos determinados rangos de temperatura, humedad relativa, velocidad de flujo de aire y humedad contenida en el sólido, para el cual han sido desarrollados. En la tabla (2) se muestran los modelos semi-empíricos más utilizados.

**Tabla 2: Modelos de cálculo, evolución de la humedad en el producto.**

Modelo	Ecuación
Modelo de Lewis	$MR = e^{-kt}$
Modelo de Page	$MR = e^{-kt^n}$
Modelo de Henderson y Pabis	$MR = ae^{-kt}$
Modelo de segundo orden	$MR = ae^{-kt} + be^{-pt}$
Modelo de Thompson	$t = aLnMR + b(LnMR)^2$

Mediante un ensayo se determina el coeficiente de correlación ( $r^2$ ), el coeficiente medio error (MSE) y la desviación relativa (P), definida como:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{M_i - M_{pri}}{M_i}$$

**Ecuación 11**

Estos tres coeficientes son usados como criterio para elegir el modelo más adecuado para realizar los cálculos en el proceso. El modelo más adecuado será aquel que tenga el mayor coeficiente de correlación, el menor error medio y la menor desviación relativa

El Modelo de Thomson describe el proceso de tostado y secado de las avellanas con valores aceptables de MSE y P-value, y un alto coeficiente de correlación.

$$t = aLnMR + b(LnMR)^2$$

**Ecuación 12**

Los coeficientes de Thomson, a y b, son calculados usando el polinomio de primer grado en la resolución de la serie de la ley de Fick.

El modelo con sus coeficientes es:

$$t = (-116.05 + 0.656T)LnMR + (-19,89 + 0,122T)(LnMR)^2$$

**Ecuación 13**

Este modelo propuesto es válido para las avellanas, y para una temperatura de aire comprendida entre 100 y 149 °C.

Para controlar la temperatura y la humedad en el producto a medida que avanza el proceso de secado, vamos a calcular todos sus parámetros, en intervalos temporales de dos minutos de duración, designados por el índice entero  $i$ , tal que:

$$t = i \Delta t$$

Para:

$$i = 1, 2, 3 \dots n$$

$$\Delta t = 180s$$

**Ecuación 14**

### 1.3 Estudio del proceso de secado:

#### 1.3.1 Balance de masa y energía:

En el proceso de secado tiene lugar una transferencia de calor del aire hacia el producto, y una transferencia de masa del producto hacia el aire. Los balances de masa y energía son calculados para cada intervalo temporal son los siguientes:

Balance de masa:

$$\begin{aligned} \Delta t \dot{m}_{aire}(i)(w_{aire,salida}(i) - w_{aire,entrada}) \\ = m_{avellanas,secas}(M_{avellanas}(i - 1) - M_{avellanas}(i)) \end{aligned}$$

**Ecuación 15**

Balance de energía:

El aire cede calor por convección a la avellana y como resultado el aire disminuye su temperatura a la salida; este calor aportado por el aire tiene dos consecuencias

1. como calor sensible aumenta la temperatura de la avellana,
2. como calor latente da lugar a la evaporación del agua que se encuentra no ligada en su superficie,

Por tanto el balance de energía global es el siguiente:

$$Q_{avellana}(i) = Q_{aire}(i) - Q_{evaporación}(i)$$

Ecuación 16

El calor sensible que absorbe la avellana es:

$$Q_{avellana}(i) = m_{avellana,secas} (cp_{avellanas} + M(i) cp_{agua}) \Delta T_{avellana}(i)$$

Ecuación 17

El calor latente que absorbe el agua al evaporarse es:

$$Q_{evaporación}(i) = m_{agua,evaporada}(i) h_{vaporización,agua}(T_{lecho}(i))$$

Ecuación 18

El calor cedido por el aire, que es la energía utilizada en el proceso:

$$Q_{aire}(i) = m_{aire}(i) cp_{aire}(T_{aire,entrada} - T_{aire,salida}(i))$$

Ecuación 19

La temperatura de salida del aire, se calcula mas adelante con la ecuación 17.

### 1.3.2 Cinética de transferencia de calor.

La cinética del calor cedido se controla por convección, ya que se trata de un sistema de capacidad, donde podemos despreciar la resistencia interna del producto, es decir la transferencia de calor en el interior del producto. Los sistemas de capacidad se caracterizan por tener un número de Biot menor de 0.1, como en el caso de las avellanas:

$$Bi = \frac{h_{convección} D_p}{6\lambda} = \frac{83 \cdot 0.01}{6 \cdot 1.66} < 0.1$$

Ecuación 20

El calor transferido por convección a las avellanas es:

$$Q_{aire}(i) = h_{convección} A_{lecho} \Delta T(i)_{lm}$$

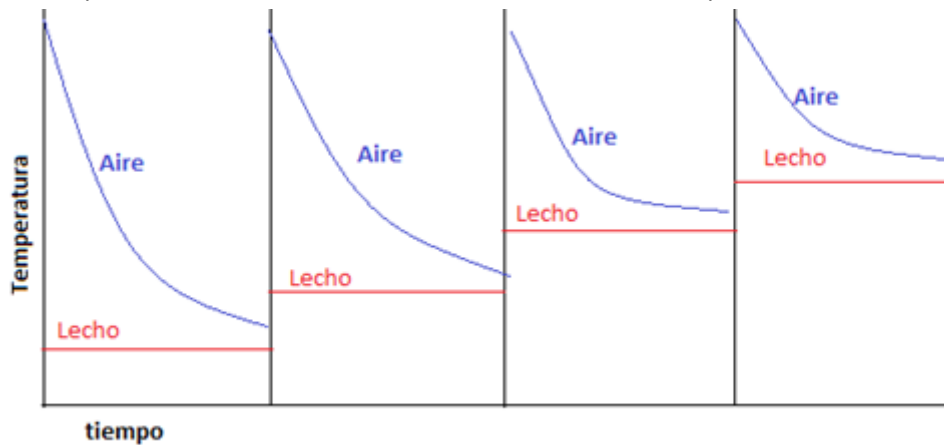
Ecuación 21

El aire le cede calor al lecho, y por lo tanto el aire disminuye su temperatura en el interior del secadero, la disminución de la temperatura del aire se produce de forma exponencial, cuanto mayor sea el gradiente de temperaturas entre el aire y el lecho, la cesión del calor será mayor. En la discretización temporal realizada, consideramos que la temperatura del lecho se mantiene constante en cada intervalo.



Figura 3: Evolución de la temperatura del lecho y el aire en un intervalo en el interior del secadero.

La temperatura del lecho aumentará en cada intervalo temporal.



Figuran 4: Evolución de la temperatura del lecho y el aire en el interior del secadero en intervalos consecutivos.

Dada la naturaleza exponencial de la variación de  $\Delta T$ , no es adecuada una media aritmética para la expresión global de la convección, y deberemos calcular la media logarítmica del salto de temperaturas.

La temperatura media logarítmica es:

$$\Delta T(i)_{lm} = \frac{(T_{aire,entrada} - T_{lecho(i)}) + (T_{aire,salida(i)} - T_{lecho(i)})}{Ln \frac{(T_{aire,entrada} - T_{lecho(i)})}{(T_{aire,salida(i)} - T_{lecho(i)})}}$$

Ecuación 22

Igualando el calor que cede el aire por convección, con el calor sensible cedido por el aire, obtenemos la evolución térmica del aire:

$$\frac{T_{salida,aire(i)} - T_{lecho(i)}}{T_{entrada,aire} - T_{lecho(i)}} = e^{\frac{-h_{convección} A_{lecho}}{m_{aire} c_{p_{aire}}}}$$

Ecuación 23

Debemos obtener el coeficiente de convección del producto para modelar la evolución de la temperatura del aire a medida que le cede calor por convección a la avellana, mientras la avellana aumenta su temperatura progresivamente en cada etapa.

#### 1.3.4 Coeficiente de convección del producto

Al tratarse de circulación de aire través de un lecho empaquetado, donde existe una gran área de intercambio (de calor o de masa) en un pequeño volumen, y el flujo irregular que hay en los huecos del lecho aumenta el transporte mediante mezcla turbulenta.

Para el cálculo del coeficiente de convección del producto, calcularemos el número de Nusselt mediante las correlaciones de Whitaker, que es válida para lechos caóticamente empaquetados de esferas.

$$Nu = 0.5Re^{1/2} + 0.2Re^{2/3}Pr^{1/2}$$

Ecuación 24



Siendo la porosidad del lecho,  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen vacío}}{\text{Volumen del lecho}}$$

Ecuación 25

EL número de Reynolds:

$$Re = \frac{D_p v_{\text{aire}}}{\nu(1 - \varepsilon)}$$

Ecuación 26

El diámetro de la partícula:

$$D_p = 6 \frac{\text{Volumen partícula}}{\text{Área partícula}}$$

Ecuación 27

Y definitivamente podremos despejar el coeficiente de convección, del número de Nusselt:

$$Nu = \frac{h D_p}{\lambda} \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

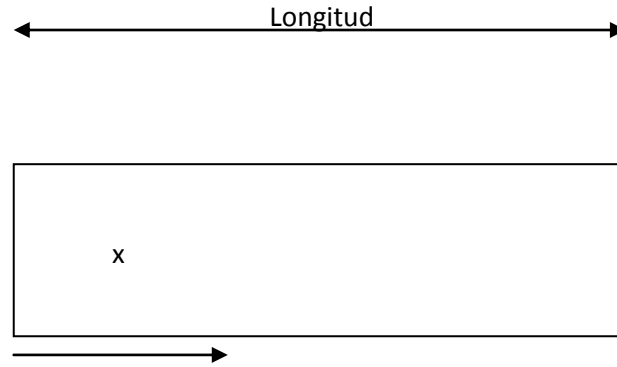
Ecuación 28

Valido para valores de Reynolds comprendido entre 22 y 8000,  $\varepsilon < 0.74$ , y numero de Prandtl para gases cercano a 0.7 ( $Pr=0.7$ ), y el coeficiente de convección tiene un valor entorno a ochenta, ( $h_{\text{convección}} \sim 80 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

### 1.3.5 Saturación del aire en el secadero

Para cada intervalo, hay que comprobar que la humedad relativa del aire a la salida sea menor del 100%; es decir que no esté saturado, ya que una vez alcanzado el punto de saturación, el aire no puede absorber más vapor de agua, y hay que modificar el balance de energía para simular la condensación del agua en el grano. (Artículo: T.L. Thomson, R.M. Peart and G.H. Foster, 1968).

En el caso de que la humedad relativa del aire a la salida sea mayor del 100%, el aire se habrá saturado dentro del secadero, cuando haya recorrido una distancia  $x$ , a partir de este momento el agua evaporada en el producto se condensa, ya que el aire no es capaz de absorber más cantidad de vapor de agua, el agua condensada cae sobre el producto y éste no varía su humedad.



Figuran 6: Vista del área longitudinal del secadero.

Para temperaturas de aire menores de los 140 °C, el aire se satura a su paso por el secadero en el primer intervalo, y para temperaturas superiores se satura en sus dos primeros intervalos, por lo que deberemos modificar el algoritmo, según las diferentes etapas de saturación en cada caso.

1. Imponemos una humedad relativa a la salida del aire del 100%.  
Calculamos la humedad específica del aire para su presión de salida, temperatura de salida, y humedad relativa del 100%.
2. Planteamos el balance de masa, y así obtenemos la humedad final de la avellana.

$$m_{avellanas,secas} (M_{(i)} - M_{(i-1)}) = \dot{m}_{aire(i)} \Delta t (w_{saturación(i)} - w_o)$$

Ecuación 29

3. La masa de agua evaporada es recalculada, y el balance de energía modificado.

$$Q_{evaporacion(i)} = (M_i - M_{i-1})m_{avellanas}h_{evaporación}(T_{aire})$$

Ecuación 30

Comparamos la diferencia en los resultados si se lleva a cabo o no la corrección del algoritmo, para una temperatura de 130°C y velocidad de 0.8m/s:

**Tabla 3: Comparativa de resultados con y sin modificación de algoritmo.**

	Humedad relativa (1)	$Q_{\text{sensible}}(\text{KJ/kg avellana})$	$Q_{\text{latente}}(\text{KJ/Kg avellana})$	Temperatura avellana (1)
Sin modificar	1.541	25.83	9.029	15.75 °C
Corregido	1	26.42	6.658	16 °C

Para temperaturas mayores de 140°C, al disminuir la velocidad del aire, el aire se llega a saturar en los cuatro primeros intervalos, por lo tanto hay que volver a modificar el algoritmo, e implementar hasta cuatro etapas de saturación.

#### **1.4 Gasto energético:**

##### **1.4.1 Calentamiento del aire**

El aire utilizado en el proceso de secado es obtenido del ambiente, la temperatura y humedad del aire ambiente variará según la época del año y según la localización del secadero. El aire entra a presión atmosférica en la caldera, donde es calentado a presión constante y a humedad específica constante, hasta la temperatura necesaria en el secadero, que en el caso de las avellanas será una temperatura mínima de 100 grados, y máxima de 160 grados. En cuanto la humedad del aire a la entrada, si observamos el diagrama psicrométrico, comprobamos que dentro de los valores normales de humedad relativa y temperatura ambiente, después de someter el aire a un proceso de calentamiento por encima de cien grados, la humedad relativa del aire es prácticamente nula. Valor que obtenemos en el algoritmo, imponiendo la temperatura deseada a la entrada, presión atmosférica y conservando la humedad específica del aire ambiente.

$$Q_{\text{calentar,aire}} = m_{\text{aire,total}}(h_{\text{final}}(T_{\text{aire,entrada}}) - h_{\text{inicial}}(T_o))$$

**Ecuación 31**

##### **1.4.2 Bombeo del aire**

La potencia de bombeo para impulsar el aire a través del secadero:

$$W_{bombeo} = \Delta P v_{aire} A$$

Ecuación 32

Por lo tanto el trabajo necesario para impulsar el aire a través del secadero:

$$W_{impulsion} = W_{bombeo} tiempo$$

Ecuación 33

Obtenemos la pérdida de carga mediante la *correlación de Ergun y Orning* para lechos empaquetados de esferas y cilindros. Esta correlación se basa en la *correlación de Reynolds*, que expreso la caída de presión a través de un lecho poroso, referido a la longitud del lecho, como la suma de dos terminos, el primero directamente proporcional a velocidad del aire a través del lecho y el segundo proporcional al producto de la densidad del aire y de su velocidad al cuadrado.

$$\Delta P = av + b\rho v^2$$

Ecuación 34

A partir de la expresión de Reynolds, *Ergun y Orning* propusieron la siguiente ecuación, realizando diferentes experimentos en lechos de diferentes características.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150\mu \frac{1}{D_p^2} \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} v + 1.75\rho \frac{1}{D_p^2} \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} v^2$$

Ecuación 35

El gasto energético total necesario será la suma de la energía total necesaria para calentar el aire, y el trabajo de impulsión.

## CAPÍTULO 2

### Optimización energética

---

Las variables que se pueden modificar para buscar la optimización energética del secadero son la temperatura del aire, la velocidad del aire y la humedad del aire a la entrada; modificamos la temperatura del aire para el intervalo de temperaturas propuesto para el tostado de avellanas (100-149°C), y modificaremos la velocidad para valores superiores al punto de velocidad crítica (0.1m/s), que es aquella por debajo de la cual la difusión en el grano se ve afectada, dejando de ser solo dependiente de la temperatura del aire. La humedad del aire, será la humedad del aire ambiente, sometiendo únicamente al aire a un proceso de calentamiento hasta la temperatura adecuada, e impulsando el aire a la entrada del secadero con la velocidad requerida.

Debido a la dependencia de la difusión con la temperatura del aire, es esta la variable más importante a tener en cuenta en la optimización. Se comienza optimizando el tiempo para cada temperatura, para ello se introduce en el algoritmo el rango de temperatura en saltos de 5°C, se comprueba que el aire no se satura en ningún intervalo, en los intervalos que se satura, se modifica el balance, como es explicado en el capítulo uno. De este modo se obtiene el tiempo óptimo para cada temperatura del aire, y se analizan los resultados.

Una vez obtenido el tiempo óptimo, se procede a buscar la velocidad óptima para cada temperatura, que será la velocidad que cumpla las especificaciones de humedad y temperatura deseada en el producto con el consumo mínimo de energía.

La humedad requerida para considerar que se ha completado el proceso de secado en la avellanas, es una humedad específica final menor de un kg agua/kg de producto seco; la temperatura final requerida en la avellana para considerar que el proceso de tostado ha finalizado y no ha perdido sus propiedades alimenticias, es una temperatura mínima de 90°C, y una temperatura máxima de 110°C; criterio que es obtenido de los resultados en el horno del artículo de Murat Özdemir, y Onur Devres publicado en 1999, que considera válida una temperatura del *aire* de 104°C y un tiempo de secado para dicha temperatura de 60 minutos.

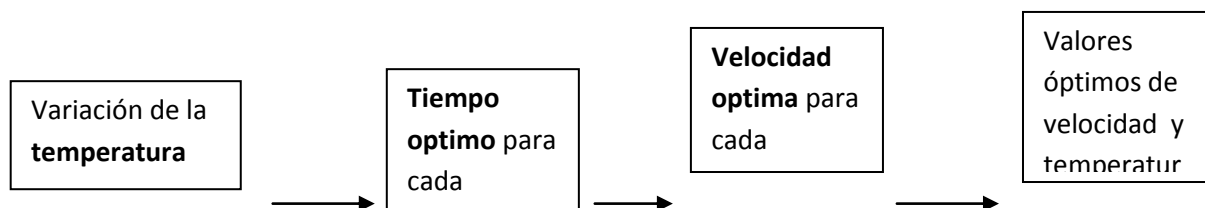


Figura 7: Esquema de los pasos a seguir en la optimización.

## 2.1 Temperatura del aire:

La temperatura del aire es la variable principal en el proceso de secado y tostado, influye directamente en la tasa y velocidad de secado y por tanto en el calor necesario a aportar al aire, así como en la calidad final de producto a secar y en la energía necesaria para llevar a cabo el proceso. A continuación se estudia cómo influye la temperatura del aire en las variables más importantes del proceso:

### 2.1.1 Tiempo y energía:

Un aumento de la temperatura del aire aumenta la difusividad del agua en el interior de la avellana y se reduce el tiempo de secado y la cantidad de aire necesario.

Tabla 4: Influencia del aumento de temperatura del aire en las variables principales.

Tiempo	Masa de aire	Temperatura avellana
Disminuye	Disminuye	Aumenta

Consideramos la importancia de estas variables por estar directamente ligadas al consumo de energía necesario para calentar el aire, y en la calidad del producto.

Analizando los resultados para cada temperatura, se elige el mínimo tiempo para el cual el producto cumple las especificaciones finales requeridas, explicadas al comienzo del capítulo, para una mejor comprensión de los resultados obtenidos, ver *Anexo III*.

Tabla 5: Análisis de resultados, variación de la temperatura.

Temperatura	Tiempo	Energía calefacción	Temperatura	Humedad
-------------	--------	---------------------	-------------	---------

aire (°C)	(minutos)	(KJ/Kg avellana)	avellana (°C)	fina(%)
104	60	739.1	95.22	0.977
110	57	736.4	100.2	0.9033
115	54	729.3	104	0.8645
120	48	657.7	106.2	0.9641
125	45	658.5	109	0.9229
130	42	637.4	111.4	0.877
135	39	621.6	107.8	0.826
140	33	535.5	110.4	0.9523
145	30	502	109.4	0.8961
149	27	462.5	106.5	0.8885

Cuanto mayor sea la temperatura del aire a la entrada del secadero, mayor es la cantidad de energía necesaria para calentar el aire. A su vez una temperatura mayor en el secadero acelera el proceso de secado, reduciendo considerablemente el tiempo de secado y por lo tanto la masa total de aire a utilizar en el secadero. Dicha disminución de masa, reduce en mayor medida la energía necesaria para calentar el aire, por tanto al aumentar la temperatura en el secadero dentro de los márgenes de funcionamiento, estamos reduciendo el gasto energético empleado en calentamiento y agilizando el secado, pudiendo aumentar su productividad, es decir los kilogramos de avellanas tostadas diariamente. En la figura (7) se muestra la reducción del tiempo de secado con el aumento de temperatura del aire.

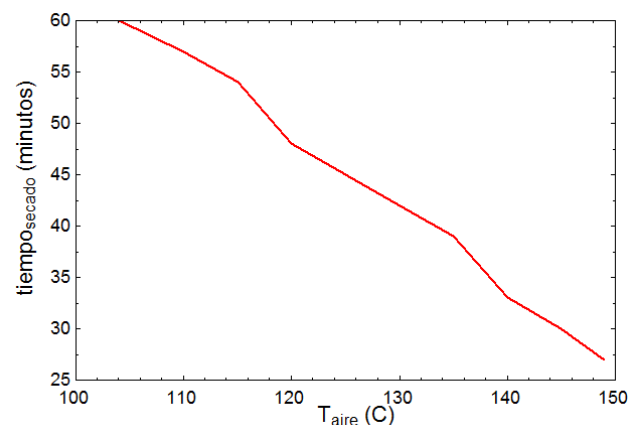


Figura 8: Grafica temperatura de aire vs tiempo optimo del proceso

A continuación se muestra una evolución de la temperatura final de la avellana al aumentar la temperatura del aire en el secadero. La temperatura máxima final recomendable en el tostado de avellanas es de 110°C, en la figura (8) se muestra dicha temperatura con un línea horizontal, las temperaturas finales en la avellana por encima de esta línea no son admisibles, y se necesitaría reajustar la velocidad del aire para dichas temperaturas (ver capítulo 3).

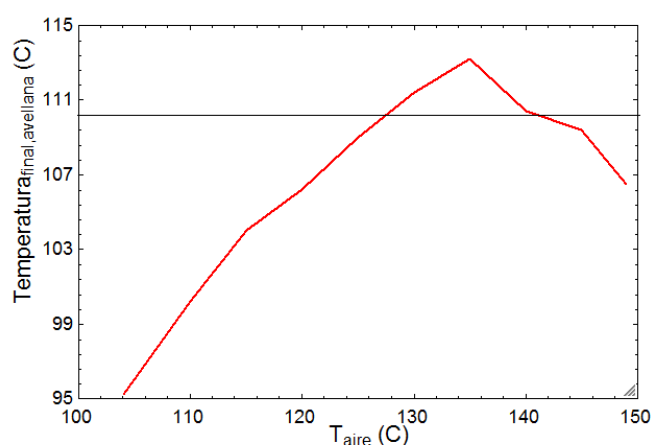


Figura 9: Grafica temperatura de aire vs temperatura final de la avellana.

### 2.1.2 Trabajo mecánico

El trabajo mecánico es aquel que hay que aportar al proceso para mover el aire en el interior del secadero, este trabajo va depender de varios factores. Entre ellos el principal es el tiempo de secado como se observa en la ecuación (33) y la potencia de bombeo (ecuación 32), que a su vez depende de la velocidad del aire, y de la caída de presión en el interior del secadero. Ambos factores disminuyen al aumentar la temperatura. La caída de presión depende de la viscosidad y de la densidad del aire, la viscosidad del aire aumenta con la temperatura y la densidad disminuye, la disminución en la densidad del aire afecta en mayor medida, puesto que la densidad es del orden de uno y proporcional al cuadrado con la velocidad, mientras la viscosidad es del orden de  $10^{-5}$  y lineal con la velocidad, (ecuación 35), por lo tanto la caída de presión disminuye gracias a la disminución de la densidad con la temperatura. Sin embargo la disminución en la caída de presión no es relevante, y la fuerte disminución del trabajo de impulsión se consigue con la minimización del tiempo de secado, ya que al aumentar la temperatura disminuimos el tiempo y la cantidad de aire a impulsar. A continuación se muestra una tabla con los valores del trabajo de impulsión y caída de presión



para cada temperatura y una gráfica que muestra la importante disminución del trabajo de impulsión con el aumento de temperatura.

Tabla 6: Variación del trabajo en función de la temperatura.

Temperatura aire (°C)	W impulsión (KJ/Kg p.s.)	Caída de presión (KPa)
104	190	19.1
110	177.7	18.81
115	166.2	18.56
120	145.9	18.33
125	135	18.10
130	124.5	17.88
135	114.2	17.66
140	95.45	17.45
145	85.74	17.24
149	76.44	17.08

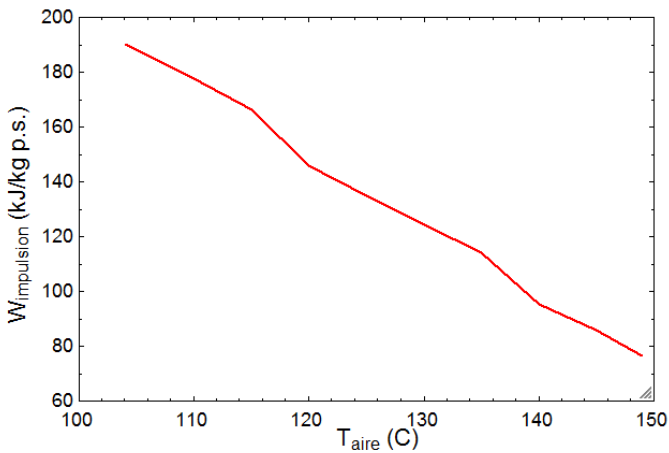


Figura 10: Temperatura del aire vs trabajo de impulsión.

### **2.1.3 Rendimiento energético:**

El rendimiento energético es la relación entre el calor que cede el aire a las avellanas, y la energía necesaria para calentar y mover el aire en el interior del secadero.

$$\eta_{energetico} = \frac{\text{Calor aportado por el aire}}{Q_{calentar,aire} + W_{impulsion}}$$

Ecuación36

**Tabla 7: Variación del rendimiento energético con la temperatura.**

Temperatura aire	Rendimiento energético (%)
104	32
110	33.56
115	35.23
120	38.67
125	40.87
130	43.31
135	46.02
140	51.62
145	55.24
149	59.07

El rendimiento energético aumenta con la temperatura debido a la disminución de la energía para calentar el aire y del trabajo de impulsión.

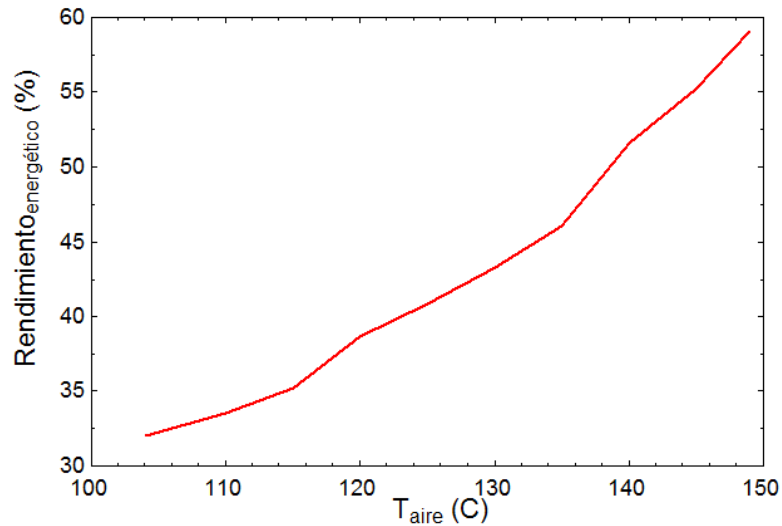


Figura 11: Temperatura del aire vs rendimiento energético del proceso

#### 2.1.4. Exergía:

La exergía es el máximo trabajo teórico que puede realizar un sistema hasta alcanzar el equilibrio con el ambiente. Es por tanto la capacidad de realizar trabajo. Es una variable importante en la optimización ya que su valoración nos da un indicativo del aprovechamiento energético del proceso.

La eficiencia exergética es la relación entre la exergía usada en el proceso de secado del producto y la exergía introducida en el sistema, la exergía del aire a la salida del secadero se considera exergía perdida. (Artículo: Otniel Corzo, Nelson Bracho, Alberto Vásquez, Angel Pereira, 2007.)

$$\eta_{exergetico} = \frac{Exergía_{introducida} - Exergía_{salida}}{Exergía_{introducida}} = 1 - \frac{Exergía_{salida}}{Exergía_{introducida}}$$

Ecuación 37

La exergía para sistemas de flujo fijo se calcula mediante la siguiente ecuación, siendo la temperatura de referencia la temperatura ambiente del aire, se ha tomado un valor medio de 25°C:

$$Exergía(i) = m_{aire}(i)cp_{aire} [(T_{aire(i)} - T_{ref}) - T_{ref}Ln\frac{T_{aire(i)}}{T_{ref}}]$$

Ecuación 38

Tabla 8: Variación de la eficiencia exergética con la temperatura.

Temperatura aire	Exergía entrada (kJ)	Exergía salida (kJ)	Rendimiento exergetico %
104	82.83	38.3	53.76
110	88.74	39.63	55.34
115	92.24	39.59	57
120	89.44	34.55	61.38
125	90.98	32.87	63.87
130	91.71	30.62	66.61
135	91.57	27.84	69.6
140	83	20.04	75.85
145	80.55	16.54	79.46
149	76.2	12.86	83.12

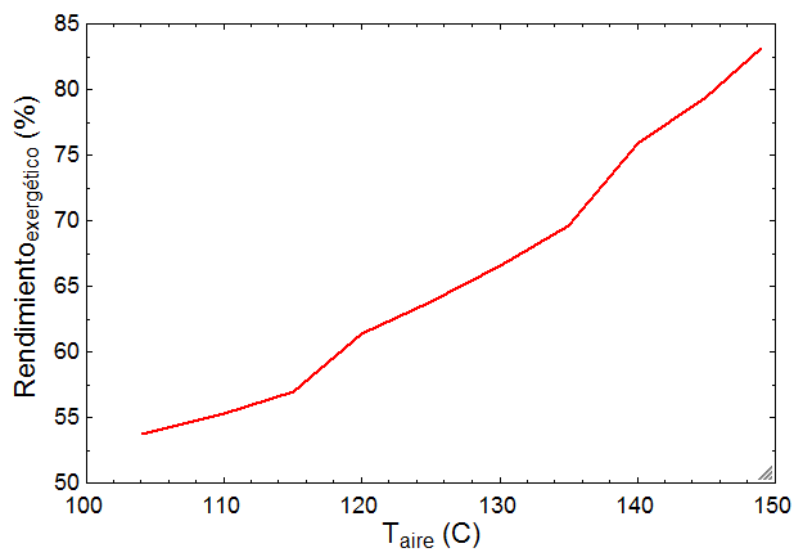


Figura 12: Grafica temperatura del aire vs rendimiento exergético

## **2.1 Velocidad del aire:**

### **2.2**

La difusión del líquido en el sólido es independiente de la velocidad del aire, por lo tanto la humedad final del producto no varía al modificar la velocidad. No obstante, es una variable clave ya que influye en el consumo energético y en la temperatura final del producto. El rendimiento energético es aumentado al disminuir la velocidad ya que se reduce el trabajo de impulsión, debido a la disminución en la caída de presión y en la potencia de impulsión, a la vez que se reduce la energía empleada en calentar el aire, ya que el caudal de aire, es proporcional a la velocidad del aire. Por el contrario el intercambio de calor convectivo se ve disminuido por el decrecimiento del caudal de aire, y la temperatura final de la avellana disminuye.

**Tabla 9: Influencia de la disminución de la velocidad del aire en las variables principales.**

$\Delta P$	W impulsión	Temperatura avellana	Caudal de aire	Energía calentamiento	Humedad final
Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Constante

Realizando una variación de velocidad para cada temperatura, y escogiendo la mínima velocidad para las que el producto final cumple las condiciones deseadas. Se ha obtenido la velocidad óptima para cada temperatura (*Anexo IV*).

Al disminuir la velocidad, el aire incrementa sus etapas de saturación a su paso por el secadero, por lo tanto hay que modificar el algoritmo para un correcto análisis de resultados.

**Tabla 10: Resultados de velocidad óptima para cada temperatura.**

Temperatura aire (°C)	Velocidad (m/s)	W impulsión (kJ/kg p.s.)	Energía calefacción (kJ/kg p.s.)	Energía total (kJ/kg p.s.)	Rendimiento Energético (%)	Tfinal (°C)
104	0.61	84.31	558	642.3	44.28	90.18
110	0.54	54.73	497.1	551.8	51.98	90.74
115	0.5	40.64	455.8	496.44	57.74	90.34
120	0.51	37.85	430	468.6	60.77	90.38
125	0.5	33.02	411.6	494.62	64.15	90.43
130	0.5	30.44	398.4	428.84	66.74	90.42
135	0.51	29.63	390.5	420.13	68.57	90.85
140	0.56	32.78	374.8	407.1	69.68	90.28

145	0.59	34.3	370.2	407.8	70.29	90.7
149	0.63	37.36	364.2	401.8	69.76	90.66

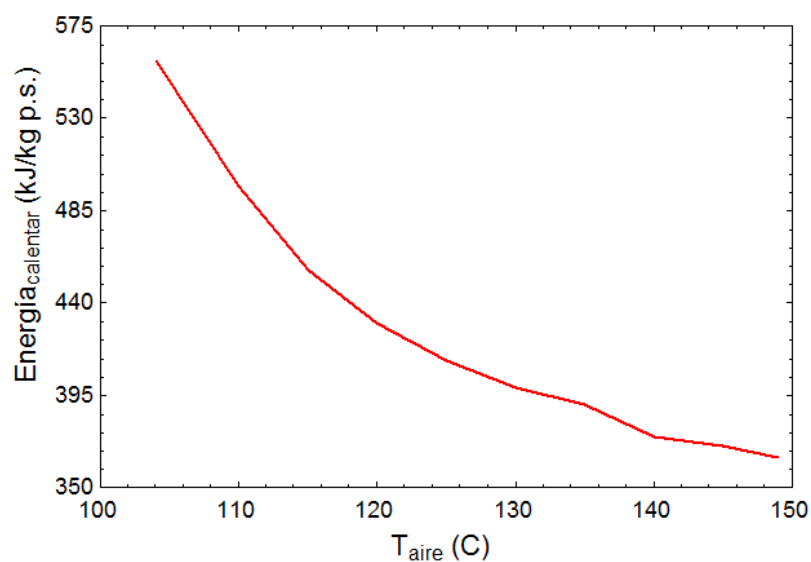


Figura 53: Energía calentar aire vs temperatura del aire, velocidad óptima.

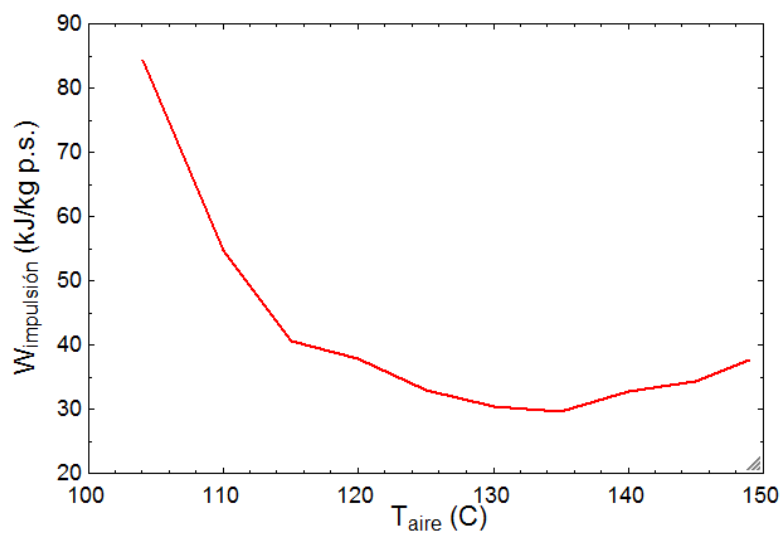


Figura 14: Trabajo de impulsión vs temperatura del aire, velocidad optima

Manteniendo la velocidad constante, observamos que un aumento de temperatura siempre supone un ahorro energético, pero al entrar en juego la optimización de la velocidad el mejor rendimiento energético se consigue para la temperatura de 145°C, ya que para temperaturas mayores no se permite una disminución tan importante de la velocidad, a pesar

de que el tiempo optimo continua disminuyendo y por tanto el consumo energético para calentar el aire disminuye, el trabajo de impulsión aumenta, y el consumo energético global aumenta.

#### **Valores óptimos:**

**Temperatura del aire: 145°C**

**Velocidad del aire: 0.59 m/s**

**Saturación en las tres primeras etapas del proceso.**

Dado que el secadero es un prisma de sección rectangular, se trata de estudiar el efecto de modificar su longitud y su sección en el consumo energético, y en las características finales de la avellana.

#### **2.3. Longitud del horno:**

La longitud del horno no influye en el proceso de evaporación; la humedad final del producto es la misma independientemente de la longitud del horno, sin embargo, sí que influye en el intercambio de calor sensible, es decir en el intercambio convectivo de calor entre el aire y el producto, por lo tanto la temperatura final del producto, y la temperatura de salida del aire si se ve afecta, observando una disminución de ambas temperaturas al aumentar la longitud del horno; como consecuencia del aumento de área de contacto entre el aire y el producto, a la vez que se mantiene un flujo de aire constante.

El aumento de la longitud del horno, supone una mejora energética, debido a un mejor aprovechamiento del flujo de aire, es decir, empleamos la misma masa de aire para secar mayor cantidad de producto; sin que sea aumentado el trabajo de impulsión, ya que aunque la caída de presión es mayor, y por lo tanto la potencia de bombeo aumenta, al aumentar en la misma proporción que el volumen de producto a secar, el trabajo de impulsión por kilogramo de producto no se ve afectado. Por tanto, el aumento de la longitud del horno mejora el rendimiento energético, pero su aumento está limitado con la temperatura final requerida en el producto.

Se observa una mejora en el rendimiento exergético como consecuencia de la disminución de la temperatura del aire a la salida y por tanto, de la disminución del salto de temperaturas entre el aire a la salida del secadero y el aire ambiente.

**Tabla 21: variación de las variables al aumentar la longitud del horno.**

Temperatura final del producto	Humedad final del producto	Masa total producto	Potencia bombeo	W impulsión/Kg de producto	Energía calentar/Kg producto	Rendimiento energético	Rendimiento exergético
Disminuye	Constante	Aumenta	Aumenta	Constante	Disminuye	Aumenta	Aumenta

Analisis de la variación de la longitud del horno, para las condiciones optimas de velocidad y temperatura del aire:

Con el objetivo de mejorar el rendimiento energetico del secadero se ha reducido la velocidad hasta el punto para el cual, las avellanas cumplían la minima temperatura de tostado. Para el valor optimo en función de la temperatura, tiempo y velocidad no es posible mejorar elrendimiento energetico aumentando la longitud del secadero, ya que la temperatura final de la avellana no alcanzaría el valor minimo, 90°C, para su tostado.

**Tabla 12: Variación de longitud para el valor optimo de temperatura y velocidad.**

Temperatura (oC)	Velocidad (m/s)	Longitud (m)	Temperatura Final producto (°C)	Rendimiento energetico (%)	Rendimiento exergetico (%)	
145	0.59	0.7	93.53	68.99	88.49	
145	0.59	0.73	90.7	70.29	89.7	Optimo
145	0.59	0.75	88.87	71.11	90.45	No alcanza mínimo de temperatura

Optimizando en función de la velocidad del aire se consigue un rendimiento mayor que optimizando en función de la longitud del secadero para la velocidad propuesta en el documento; variando los dos parametros a la vez, es decir no reduciendo la velocidad al mínimo, y aumentando la longitud del secadero no se llega alcanzar un rendimiento tan alto como para el obtenido con la velocidad minima, pero entra en juego un aumento de la productividad, es decir de los kg de producto a secar por cada operación de secado que realice el horno. Vamos a variar los dos parametros a la vez para cada temperatura, con el objetivo de encontrar la longitud optima para cada velocidad,y realizar un analisis entra la perdida de rendimiento al aumentar la velocidad y el aumento de productividad como consecuencia del aumento de longitud.



En el anexo 3, se muestra cómo influye la variación de los dos parámetros para todas las temperaturas adecuadas de aire.

**Tabla 13: Longitudes óptimas para distintas velocidades,  $T_{\text{aire}}=145^{\circ}\text{C}$ .**

v aire (m/s)	L (m)	Temperatura Final ( $^{\circ}\text{C}$ )	Energía calentar aire(KJ/Kg)	$W_{\text{impulsión}}$ (KJ/Kg)	Rendimiento Energético (%)	Masa total avellanas	
0.59	0.73	90.7	370.2	34.43	70.69	289.6	Horno Document o (Óptimo)
0.65	0.83	90.22	367.6	46.02	68.92	321.3	
0.7	0.87	90.4	368.5	57.47	66.99	345.1	
0.75	0.93	90.56	369.4	70.66	64.93	368.9	

Al aumentar la velocidad, podemos aumentar la longitud del horno hasta la temperatura mínima requerida en las avellanas, esto va a disminuir el rendimiento energético, y por lo tanto aumentará el coste de energía necesaria por kilogramo tostado de avellanas, por el contrario habremos aumentado la producción de avellanas por hornada; el aumento de energía total necesario por kilogramo no es significativo, pudiendo ser interesante ese aumento de producción por hornada, según las características de la planta donde vaya a ser instalado el horno.

Se obtienen buenos resultados en el aumento de longitud con el objetivo de aumentar la productividad, es decir los kilogramos de producto a secar por hornada para el rango de temperaturas de  $149^{\circ}\text{C}$ , hasta la temperatura de  $125^{\circ}\text{C}$ ; para temperaturas menores el rendimiento energético decae significativamente.

**Tabla 14: Valores adecuados de longitud y velocidad para cada temperatura.**

Temperatura (°C)	L (m)	Masa total de producto a secar(kg)	Rendimiento Energético (%)	Energía Total (KJ/kg p.s.)
149	0.87	345.1	66.97	426.8
145	0.81	321.3	68.97	413.6
140	0.79	309.4	68.34	416.2
135	0.79	309.4	67.48	426.3
130	0.8	317.4	65.08	440.4
125	0.88	349,1	61.01	462.2
120	0.85	341.2	57.88	491.7

Teniendo en cuenta en la optimización a cantidad de avellanas tostadas, y el rendimiento energético, la opción más acertada sería un temperatura del horno de 149°C, una velocidad de 0.75 m/s y una longitud del horno de 0.87 metros, se aumenta la producción del horno del documento en un 20% (55.5 Kg por hornada), gastando un 5% más de energía (25.74 KJ por Kg de avellanas) que en el caso óptimo para el horno del documento. Según la cantidad de producción de la instalación, habrá que valorar si compensa este aumento en el consumo total de energía por kilogramo de avellana tostada.

#### **2.4.Área transversal:**

Las variaciones geométricas del área del secadero no afectan a las condiciones finales del producto, ni a la eficiencia energética del proceso. Ya que se produce un aumento del flujo másico de aire en la misma proporción que aumenta el área de contacto del producto con las avellanas, y por tanto el intercambio de calor convectivo se mantiene, y la temperatura final del producto no varía. La masa total de aire utilizada aumenta, y por lo tanto la energía necesaria; al ser este un aumento proporcional a la masa de producto a secar; la energía empleada por kilogramo de producto seco se mantiene

.Aumentando el área transversal, aumentamos la cantidad de producto a secar, es decir los kilogramos de producto seco por hora; por lo tanto aumentamos la productividad del secadero. Se deberá elegir un área transversal en función de la productividad de la planta donde se instale el secadero.

**Tabla 15: Variación de la sección en el caso óptimo,  $T_{\text{aire}}=145^{\circ}\text{C}$ ,  $v_{\text{aire}}=0.59\text{m/s}$ .**

Sección (m <sup>2</sup> )	Humedad final avellana	Temperatura final avellana	Rendimiento Energético (%)	Caudal (kg/s)	Masa total avellanas	kg de aire/kg de avellana	
0.5	0.8961	90.7	70.69	0.2446	144.8	3.041	
1	0.8961	90.7	70.69	0.4892	289.6	3.041	Caso base
1.5	0.8961	90.7	70.69	0.7339	434.4	3.041	
2	0.8961	90.7	70.69	0.9785	579.2	3.041	

## CAPÍTULO 3

### Aplicación de la optimización al caso base.

#### 3.1 Estudio del caso base:

En el horno del caso base, propone una temperatura de  $104^{\circ}\text{C}$ , un tiempo de secado de sesenta minutos, y una velocidad de  $0.8\text{ m/s}$ , con estos parámetros analizamos el proceso y las variaciones de temperatura y humedad en la avellana.

El aire cede calor, que es invertido en evaporar el agua contenida en las avellanas (calor latente) y en elevar su temperatura (calor sensible), observamos que en la primera parte del secado, la mayor parte del calor cedido por el aire es empleado en la evaporación, a medida que avanza el proceso, disminuye el contenido de humedad en la avellana y la evaporación de agua disminuye, aumentando la proporción de calor invertido en forma de calor sensible. A su vez la temperatura del lecho se ve incrementada, el gradiente de temperatura entre el aire y el lecho disminuye, por tanto el aire cede menor cantidad de calor.

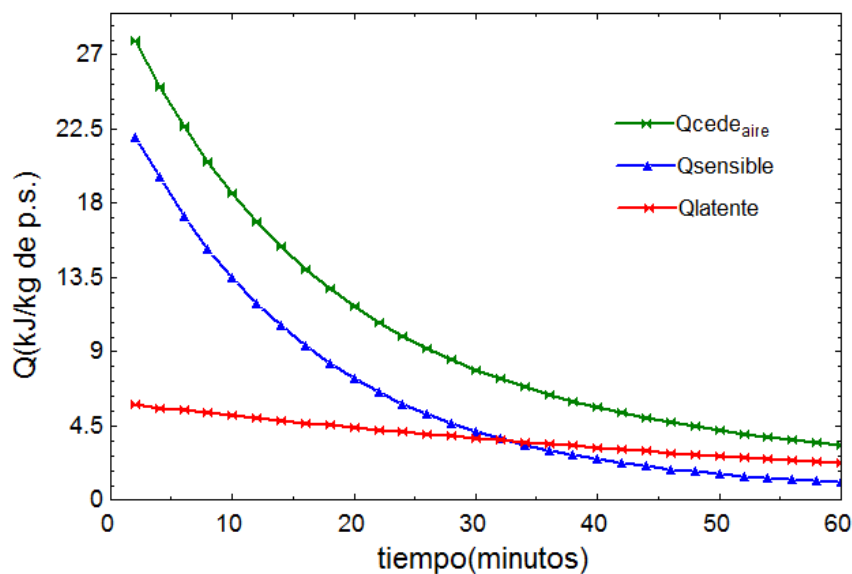


Figura 15: Evolución de los calores aportados durante el proceso

En las siguientes graficas podemos observar cómo aumenta progresivamente la temperatura de la avellana, y desciende su humedad. La velocidad de secado, que se define como la variación de humedad en función del tiempo, disminuye en la misma proporción que disminuye el contenido de humedad en el producto.

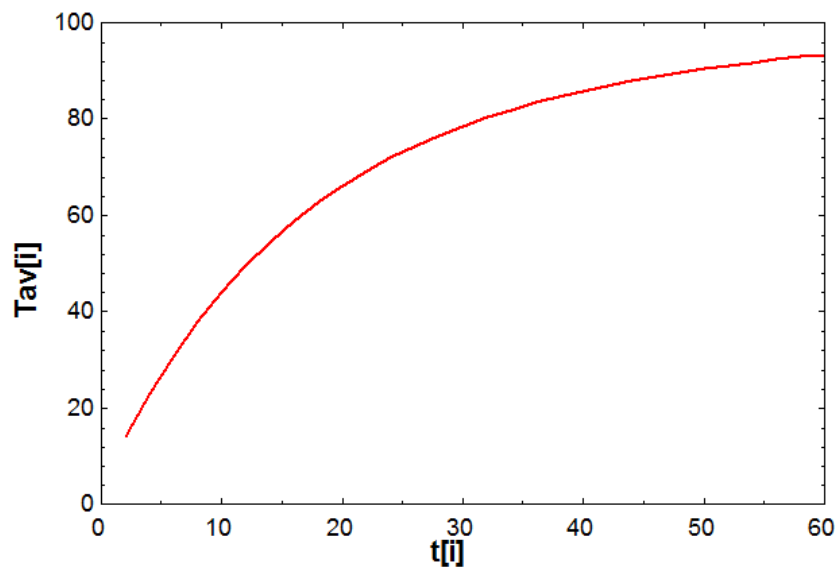


Figura 16: Evolución de la temperatura del lecho

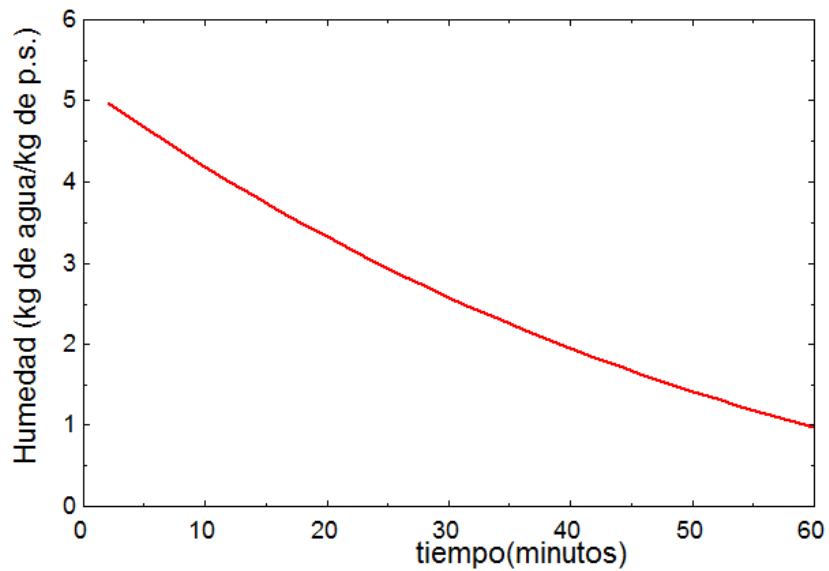


Figura 67: Evolución de la humedad en la avellana.

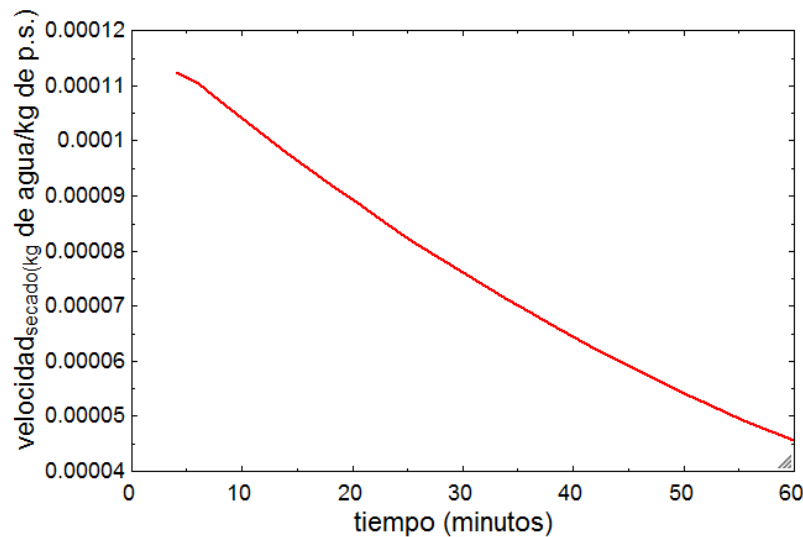


Figura 18: Evolución de la velocidad de secado durante el proceso.

### 3.2 Estudio del caso optimo:

Analizamos el comportamiento de la avellana, en el caso óptimo, es decir para una temperatura del aire de  $145^{\circ}\text{C}$ , una velocidad del aire de  $0.62\text{m/s}$  y un tiempo de secado de treinta minutos.

El aire a su paso por el secadero se satura en los cuatro primero intervalo del proceso, en la primera etapa, el aire se satura tan rápido que la mayor parte de calor que cede el aire es invertido en calor sensible, es decir en incrementar la temperatura de la avellana, en los dos siguientes etapas, el calor de evaporación se va incrementando, y el sensible disminuye, hasta un periodo en el que domina el calor latente; la evaporación y el aumento de temperatura tiende a estabilizarse, dando lugar a una tercera etapa del proceso donde la velocidad de los dos procesos decrecen en la misma proporción.

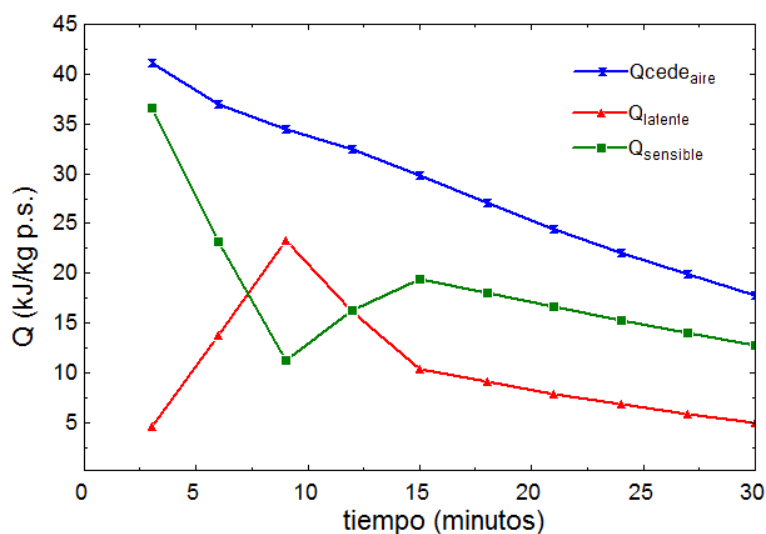


Figura 19: Evolución de los calores aportados durante el proceso

Observando la pendiente en grafica de la evolución de la temperatura en la avellana, observamos tres variaciones en la pendiente de la grafica, en los primeros instantes del proceso la temperatura en la avellana crece rápidamente, seguidamente se muestra una disminución en la velocidad de aumento de la temperatura, y a continuación un aumento y estabilización del proceso, en el que el aumento de la temperatura es prácticamente constante.

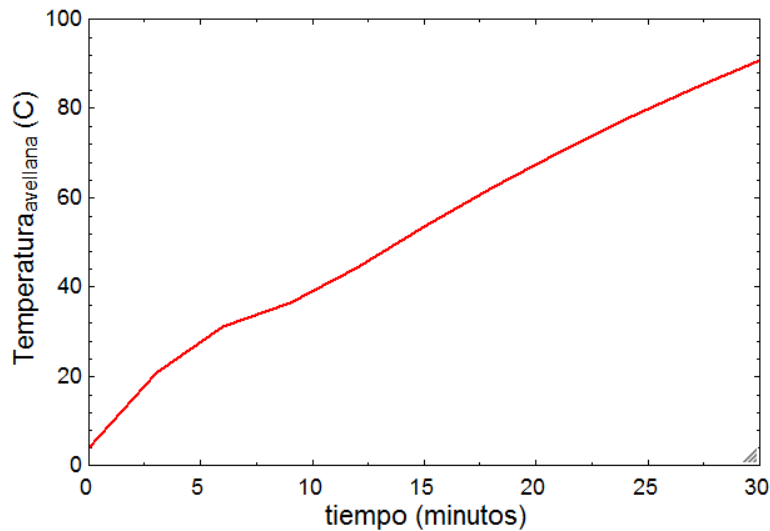


Figura 20: Evolución de la temperatura del lecho.

En la grafica que muestra la evolución de la humedad, observamos tres pendientes diferenciadas, pero de forma inversa a la temperatura, en los primeros instantes la pendiente es menor, a los pocos minutos crece la pendiente de forma brusca y seguidamente disminuye la pendiente, es decir la disminución de la humedad en el producto, y estabiliza el proceso.

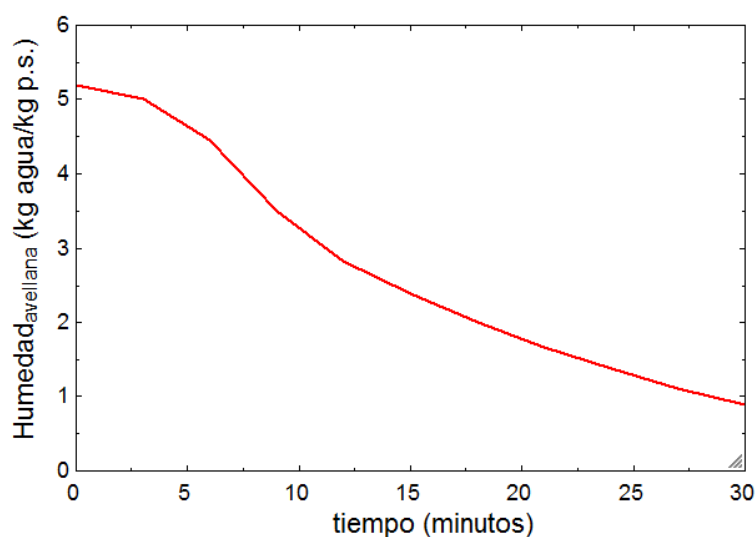
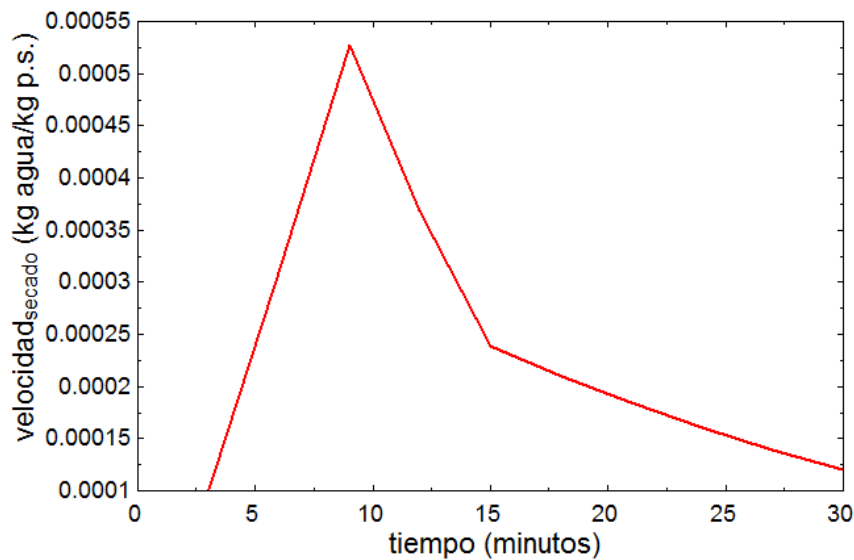


Figura 21: Evolución de la humedad del lecho.

En el caso óptimo, la velocidad de secado no decrece de forma constante en el proceso, sino que hay etapas diferenciadas, en los primeros instantes la velocidad de secado se ve incrementada hasta llegar a la velocidad máxima de secado, donde la avellana alcanza una humedad crítica, la velocidad decae bruscamente, y comienzan dos etapas de decrecimiento constante de la velocidad, la primera de pendiente muy pronunciada, y la segunda de menor pendiente, el decrecimiento es menor.



**Figura 22: Evolución de la velocidad de secado durante el proceso**

Modificando los parámetros de secado, el comportamiento de las avellanas es completamente diferente, en el caso propuesto en el artículo, el proceso ocurre de forma más continua, y en el caso óptimo la aportación de calor sensible y calor latente es variable en la primera parte del proceso, hasta llegar a un punto donde se estabiliza el proceso. Este comportamiento no influye en la calidad final de la avellana, ya que en ningún momento la avellana es sobrecalentada, y por lo tanto no pierde sus propiedades alimenticias

## CAPÍTULO 4

### Medida de ahorro de energía.

Con el objetivo de reducir el consumo de energía se estudia la instalación de un intercambiador de calor. Durante el proceso de secado la temperatura del aire a la salida se ve incrementada, siendo en las últimas etapas mayor de 50°C. La mejora consiste en llevar el aire de las últimas etapas del proceso a un intercambiador donde le cede calor al aire ambiente, y este es introducido en la caldera a mayor temperatura, y por lo tanto la de energía de calefacción se reduce.

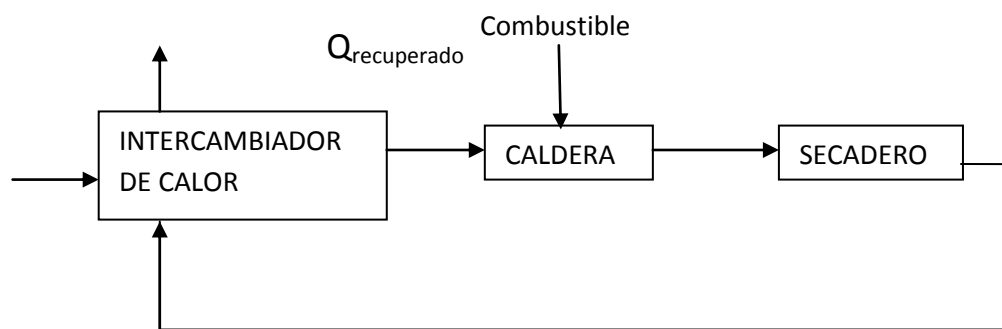


Figura 23: Esquema de la instalación de la medida energética

#### 4.1 Diseño del intercambiador:

El diseño del intercambiador consiste en la elección del modelo de intercambiador, y en el dimensionamiento del mismo, calculándose la sección, altura y número de canales del intercambiador.

Se diseña utilizando el método NTU- $\epsilon$  (ver anexo II), de manera que el calor que se va recuperar viene dado por:

$$q = \epsilon c_{min}(T_{c,e} - T_{f,e})$$



Donde  $C_{\min}$  es la capacidad calorífica,  $\dot{m}c_p$ , más pequeña entre ambos fluidos, y  $\varepsilon$  la eficiencia del intercambiador, cuya expresión depende de la relación de capacidades caloríficas de los fluidos ( $C_r$ ), siendo  $C_r \equiv C_{\min}/C_{\max}$  y del número de unidades de transferencia (NTU) definido como

$NTU \equiv \frac{UA}{C_{\min}}$ , siendo A el área de intercambio y U el coeficiente global de transferencia de calor.

Para esta aplicación es adecuado un intercambiador de placas planas y flujo a contracorriente y su eficiencia viene definida por:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]}$$

**Ecuación 40**

En este caso particular el cociente de capacidades caloríficas  $C_r$  vale uno, y la ecuación anterior se convierte en:

$$\varepsilon = \frac{NTU}{NTU + 1}$$

**Ecuación 41**

De donde

$$NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

**Ecuación 42**

Como se deduce de la formula anterior un valor alto de la eficiencia cercano a la unidad conduce a un valor muy grande de NTU, es decir del área de intercambio y del tamaño del intercambiador. Como NTU es el cociente entre la conductancia del intercambiador y la capacidad térmica de los fluidos ambos deben estar equilibrados lo que significa un valor de NTU entorno a la unidad. Un valor NTU=2 es muy adecuado y fija según la ecuación (41) un valor de  $\varepsilon=2/3$ , que es así mismo habitual.

Se elige una temperatura media de aire a la entrada del intercambiador de 60°C ( $T_{c,e}$ ) para la corriente caliente, y una temperatura media de entrada de 25°C ( $T_{f,e}$ ) para la corriente de aire frío. Se estima la temperatura de salida para la corriente fría ( $T_{f,s}$ ) y la corriente caliente ( $T_{c,s}$ ), y se utiliza la temperatura media entre la entrada y la salida de las respectivas corrientes para el cálculo de propiedades.

Siendo ambos calores específicos iguales:

$$\varepsilon = \frac{T_{f,s} - T_{f,e}}{T_{c,e} - T_{f,e}} = \frac{T_{c,e} - T_{c,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}}$$

Ecuación 43

Se calcula el coeficiente de transferencia de calor definido por:

$$U = \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_c}$$

Ecuación 44

Siendo  $h_f$  y  $h_c$ , los coeficientes de convección del aire para la corriente que absorbe el calor y la corriente que cede el calor respectivamente. Para el cálculo del coeficiente de convección se calcula el número de Nusselt para cada una de las corrientes:

$$Nu_c = \frac{\left(\frac{f_c}{8}\right)(Re_c - 1000)Pr_c}{1 - 2.7\left(\frac{f_c}{8}\right)^{0.5}}$$

Ecuación 45

El número de Reynolds:

$$Re_c = \frac{\rho_c v Dh}{\mu}$$

Ecuación 46

El diámetro hidráulico que es dos veces la altura de un canal:

$$D_h = 2 * h_{canal}$$

Ecuación 47

El coeficiente de fricción:

$$f_c = \sqrt{(-0.8685 \ln \left( \frac{1.964 \ln (Re_c) - 3.8215}{Re_c} \right))}$$

Ecuación 48

Y el coeficiente de convección:

$$h_c = \frac{Nu_c \lambda}{D_h}$$

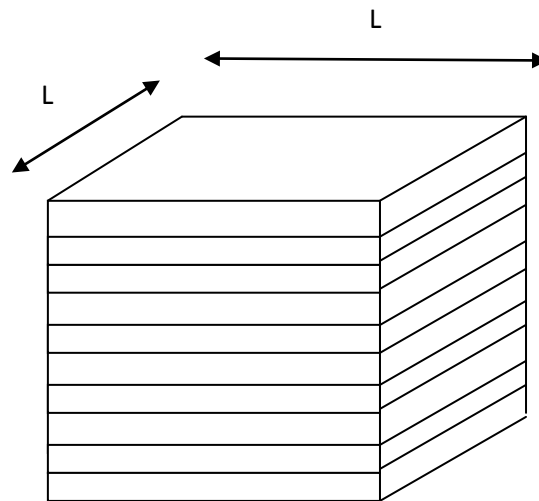
**Ecuación 49**

Se hace el mismo cálculo para la corriente de aire frío, que es la que absorbe calor, y se calcula el coeficiente de transferencia con la formula (44) y el área de transferencia de calor se obtiene de la de la definición de NTU, y es a su vez:

$$A = f_r N L^2$$

**Ecuación 50**

Donde  $f_r$  es el factor de rugosidad que hace aumentar el área, N el número de canales y L la longitud de la sección de área cuadrada.



**Figura 24: Geometría del intercambiador.**

Se introduce el algoritmo en el programa EES para realizar un análisis paramétrico de los resultados variando la velocidad del aire y el factor de rugosidad en un intervalo habitual y se selecciona el intercambiador que necesita menor trabajo de impulsión para su funcionamiento. Características del intercambiador elegido:

**Tabla 16: Características del intercambiador seleccionado.**

Número de canales	Longitud (m)	Factor de rugosidad	Velocidad aire (m/s)	Potencia de bombeo (W)	Trabajo de impulsión (kJ/kg de avellena)
49	0.6	4.5	5	52.2	0.3153

El trabajo de impulsión resulta despreciable comparado con el trabajo de impulsión en el secadero.

#### 4.2 Aplicación en el caso óptimo:

En el caso óptimo a partir del quinto intervalo, el aire sale del secadero a temperaturas mayores de 50°C, a partir de este momento el aire se lleva al recuperador de calor, para las etapas anteriores el aire es expulsado directamente a la atmosfera.

Se calcula el calor recuperado en cada intervalo:

$$q_{recuperado}(i) = \varepsilon m_{aire}(i) c_{p_{aire}} (T_{salida,aire}(i) - T_o)$$

Ecuación 51

El calor recuperado total:

$$q_{recuperado} = \sum_{i=5}^n q_{recuperado}(i)$$

Ecuación 52

El rendimiento energético con el intercambiador:

$$\eta = \frac{Q_{cede,aire}}{Energía_{calefacción} + W_{impulsión} - q_{recuperado}}$$

Ecuación 53

##### 4.2.1. Ahorro energético:

Se comparan los valores obtenidos en el caso óptimo instalando el intercambiador y sin su instalación, y se considera un rendimiento en la caldera de gas natural del 90%.

Tabla 17: comparativa de consumo energético para el caso óptimo con y sin mejora energética.

	Energía caldera (kJ/kg avellana)	Rendimiento energético proceso de secado (%)
Caso sencillo	411.3	70,6
Caso intercambiador	347.3	82,4

Con la instalación del intercambiador ahorramos 64 kJ por kg de avellana secado, y anualmente supone un ahorro energético de 26689 MJ.

#### 4.2.2 Ahorro económico:

El precio de secado de un kilogramo de avellanas depende del precio de la electricidad y del combustible utilizado y del precio del intercambiador. Se estima un precio medio de intercambiador de placas para una superficie de intercambio de 36 m<sup>2</sup> de 1000 €, las variaciones en el precio dependerán del fabricante del equipo, y tiene una vida útil de 20 años. El secadero de avellanas está en funcionamiento una media de 50 días hábiles, que es el tiempo estimado de recolección de la avellana, el cuál variará según el año y la zona de instalación. Suponiendo que durante esos días este en funcionamiento un 60% ( $f_t$ ) del tiempo, el tiempo de funcionamiento estimado del secadero durante un año es, 43200 minutos al año, y siendo el tiempo de secado por hornada en el caso óptimo 30 minutos, el secadero se pone en funcionamiento 1440 veces al año, y en cada puesta en funcionamiento se secan 289.6 kg de avellana, por lo tanto en un año se secan 417024 kg de avellanas. Siendo el precio de la electricidad y el gas natural industrial actual:

Tabla 18: precios de electricidad y gas natural en la industria.

Precio electricidad	Precio gas natural	Precio intercambiador
0,078€/kWh <sub>e</sub>	0.02 €/kWh <sub>t</sub>	1000€

El coste estimado anual del secadero es:

Tabla 19: comparativa coste de secado de avellanas anual en el caso óptimo con y sin mejora.

	Precio energía calorífica/año (€)	Precio electricidad/anual(€)	Precio instalación mejora (€/año)	Coste total anual (€)
Caso sencillo	953.33	316.8	0	1270.13
Caso intercambiador	804.52	316.8	50	1121.42

Supone un ahorro económico anual de 148.71 €.

La instalación de un intercambiador de calor se considera una mejora energética rentable económicamente, y se aconseja su instalación para el secadero de avellanas, el ahorro económico estimado aumentara en la medida que aumente la producción del secadero. En la estimación se ha considerado un caso desfavorable en el cual el secadero es utilizado un periodo corto anualmente.

### **4.3 Conclusiones:**

El objetivo principal del proyecto es conseguir la optimización energética de un secadero industrial, objetivo que se ha conseguido para el caso concreto de las avellanas mediante una adecuada elección de las variables termodinámicas y la instalación de un intercambiador de calor. Se ha conseguido aumentar en un 50% el rendimiento energético en el caso óptimo con intercambiador, comparado con el caso base (horno del artículo), lo que supone un ahorro de 514 kJ por kg de avellana secado.

Con el algoritmo diseñado en el proyecto resultaría fácil optimizar secaderos de otros productos, cambiando los datos específicos del producto, el modelo matemático usado para el control de la humedad y prestando atención a la geometría para el cálculo de los números adimensionales (Nusselt, Reynolds...), el algoritmo es válido para cualquier secadero industrial de aire caliente y geometría prismática.

El estudio realizado podría completarse calculando la rentabilidad del uso de otras medidas de ahorro energético, como puede ser el uso de energías renovables. La instalación de placas fotovoltaicas que aporten la electricidad necesaria al ventilador de aire, colectores solares para calentar el aire o una caldera de biomasa, son entre otras medidas de estudio interesantes.

# ANEXO I

## Algoritmo optimización del secadero.

---

Datos principales del programa:

"Datos horno cálculo"

$T_{\text{aire}}=104$  {Temperatura del aire del horno}  
 $\text{tiempo}=60$  {Tiempo de secado, minutos}  
 $v_{\text{aire}}=0.8$  {Velocidad de aire m/s}  
 $V_{\text{horno}}= A_{\text{trans}}_{\text{ensayo}}*L$  {Volumen del horno m<sup>3</sup>}  
 $A_{\text{trans}}_{\text{ensayo}}=1$  {Area transversal m<sup>2</sup>}  
 $L=0.73$  {Longitud del horno}  
 $V_{\text{lecho}}=V_{\text{horno}}$

"Datos producto"

$r_{\text{av}}=0.005$  {Radio avellana, m}  
 $V_{\text{av}}=4*\pi*r_{\text{av}}^3/3$  {m<sup>3</sup>}  
 $S_{\text{av}}=4*\pi*r_{\text{av}}^2$  {m<sup>2</sup>}  
 $V_{\text{cub}}=0.01^3$  {Volumen que ocupa una avellana en el lecho}  
 $cp_{\text{av}}=1994$  {Calor especifico de avellanas en J/KgK}  
 $k_{\text{av}}=0.204$  {Conductividad termica de las avellanas W/mK}  
 $\text{num}_{\text{av}}=V_{\text{lecho}}/V_{\text{cub}}$  {Numero de avellanas}  
 $V=\text{num}_{\text{av}}*V_{\text{av}}$  {Volumen real de avellanas}  
 $m_{\text{av}}_{\text{secas}}=757.63*V$  {Masa de avellanas total seca, dato densidad avellana  
seca documento}  
 $\text{compacidad}=V/V_{\text{lecho}}$   
 $A=S_{\text{av}}*\text{num}_{\text{av}}$  {Area total de contacto de las avellanas con el aire}

Tav[0]=4

{Temperatura inicial de las avellanas}

"Datos del agua"

Mi=5.2  
producto seco}

{Humedad inicial del lecho %, Kg de agua/ Kg de

M\_e=0

{Humedad de equilibrio}

cpw=Cp(Water,T=4,P=1)

{Calor especifico del agua, J/KgC}

"Datos del aire"

T\_o=25

w\_o=HumRat(AirH2O,T=T\_o, r=0.15,P=1) {Humedad especifica inicial}

w\_o=wt[0] {Humedad especifica del aire a la entrada, Kg de agua/Kg de aire  
humedo}

rho=Density(AirH2O,T=T\_aire,w=w\_o,P=1) {Densidad Kg/m^3}

cp\_aire=Cp(AirH2O,T=T\_aire,w=w\_o,P=1) {Calor específico del aire J/KgC}

vi=Viscosity(AirH2O,T=T\_aire,w=w\_o,P=1) {Viscosidad Kg/ms}

vi\_cinematica=vi/rho {Viscosidad  
cinemática m^2/s}

qmai=rho\*A\_trans\*v\_real {Caudal masico Kg/s}

k\_aire=Conductivity(AirH2O,T=T\_aire,w=w\_o,P=1) {Conductividad  
termica del aire, W/mK}

h[0]=Enthalpy(AirH2O,T=T\_aire,w=w\_o,P=1) {Entalpia a la entrada del  
secadero J/kg}

h\_ambiente=Enthalpy(AirH2O,T=T\_o,w=w\_o,P=1) {Entalpia del aire  
ambiente J/kg}

"Correlaciones para el calculo del coeficiente de convección de un flujo a través de un  
lecho compacto"

e=(V\_lecho-V)/V\_lecho {Fracción de vacio de un lecho compacto,  
porosidad}



$d_h = 6 \cdot V_{av} / S_{av}$  {Diametro hidraulico}

$G = q_{mai}$  {Gasto masico Kg/s}

$\Delta P/L = (150 \cdot v_i \cdot v_{real} \cdot (1-e)^2) / ((2 \cdot r_{av})^2 \cdot e^3) + (1.75 \cdot \rho \cdot v_{real}^2 \cdot (1-e)^2) / ((2 \cdot r_{av})^2 \cdot e^3)$  {Calculo de la perdida de carga, Pa}

$\Delta P / 100000 = 1 - P_s$  {Presion de salida en bar}

$Re = d_h \cdot v_{real} / (v_i \cdot \text{cinematica} \cdot (1-e))$  {Numero de Reynolds}

$Nu = (0.5 \cdot Re^{0.5} + 0.2 \cdot Re^{(2/3)}) \cdot Pr^{(1/3)}$  {Numero de Nusselt}

$Pr = 0.7$  {Numero de Prandtl}

$Nu = (h_{final} \cdot d_h / k_{aire}) \cdot (e / (1-e))$  {Calculo del coeficiente de convección}

{Cargar valores iniciales de iteracion}

$n = \text{tiempo} / 3$  {Numero de intervalos}

$M[0] = 5.2$

$m_{av}[0] = m_{av\_secas} + M[0] \cdot m_{av\_secas} / 100$  {masa inicial de las avellanas}

$mai = q_{mai} \cdot 3 \cdot 60$  {masa de aire en cada intervalo}

Duplicate  $i = 1, n$

$t[i] = i \cdot 3$  {tiempo en minutos}

"Ecuacion de Thompson para el calculo de la humedad en cada instante del proceso de secado"

{Obtenemos la humedad del producto en el proceso}

$$i^3 = (-116.05 + 0.656 \cdot T_{\text{aire}}) \cdot \ln((M[i] - M_e)/(M_i - M_e)) + (-19.89 + 0.122 \cdot T_{\text{aire}}) \cdot (\ln((M[i] - M_e)/(M_i - M_e)))^2$$

"Balance de masa"

$$m_{\text{ai}} \cdot (w_t[i] - w_t[0]) = m_{\text{av\_secas}} \cdot (M[i-1] - M[i]) / 100 \quad \{\text{Obtenemos la humedad específica del aire a la salida, Kg de agua/Kg de aire humedo}\}$$

$$m_{\text{av}}[i] = m_{\text{av\_secas}} + M[i] / 100 \cdot m_{\text{av\_secas}} \quad \{\text{masa de avellanas en cada intervalo}\}$$

$$m_{\text{wp}}[i] = m_{\text{av\_secas}} \cdot (M[i-1] - M[i]) / 100 \quad \{\text{Kg de agua evaporados en cada intervalo}\}$$

"Balance de energia"

$$Q_{\text{aire}}[i] = m_{\text{ai}} \cdot c_{\text{p\_aire}} \cdot (T_{\text{aire}} - T_{\text{S}}[i]) \quad \{\text{Calor total cedido por el aire en J}\}$$

$$Q_{\text{av}}[i] = Q_{\text{aire}}[i] - Q_{\text{ag}}[i] \quad \{\text{Balance}\}$$

$$Q_{\text{ag}}[i] = m_{\text{wp}}[i] \cdot h_{\text{agvap}}[i] \quad \{\text{Calor de evaporacion del agua}\}$$

$$Q_{\text{av}}[i] = m_{\text{av\_secas}} \cdot c_{\text{p\_av}} \cdot (T_{\text{av}}[i] - T_{\text{av}}[i-1]) + (m_{\text{av}}[i] - m_{\text{av\_secas}}) \cdot c_{\text{pw}} \cdot (T_{\text{av}}[i] - T_{\text{av}}[i-1]) \quad \{\text{Obtenemos la temperatura de la avellana en el proceso}\}$$

$$(T_{\text{S}}[i] - T_{\text{av\_media}}[i]) / (T_{\text{aire}} - T_{\text{av\_media}}[i]) = \exp(-h_{\text{final}} \cdot A / (q_{\text{mai}} \cdot c_{\text{p\_aire}})) \quad \{\text{Obtenemos la temperatura de salida del aire}\}$$

$$T_{\text{av\_media}}[i] = (T_{\text{av}}[i] + T_{\text{av}}[i-1]) / 2$$

$$h_{\text{agvap}}[i] = \text{Enthalpy}(\text{Water}, T = T_{\text{av\_media}}[i], x = 1) - \text{Enthalpy}(\text{Water}, T = T_{\text{av\_media}}[i], x = 0)$$

"Calor por Kg de producto seco en cada intervalo"

$$Q_{\text{unit\_seco}}[i] = Q_{\text{aire}}[i] / (m_{\text{av\_secas}} \cdot 1000) \quad \{\text{Calor que cede el aire, KJ/kg de avellana}\}$$

$$Q_{\text{unit\_sensible}}[i] = Q_{\text{av}}[i] / (m_{\text{av\_secas}} \cdot 1000) \quad \{\text{Calor sensible, KJ/kg de avellana}\}$$

$$Q_{\text{unit\_latente}}[i] = Q_{\text{ag}}[i] / (m_{\text{av\_secas}} \cdot 1000) \quad \{\text{Calor latente, KJ/kg de avellana}\}$$

"Humedad relativa"

$rh\_s[i]=RelHum(AirH_2O,T=TS[i],w=wt[i],P=Ps)$  {Humedad relativa del aire a la salida}

"Velocidad de secado, variacion de la humedad del aire en el tiempo, para cada intervalo"

$vel\_secado[i]=(M[i]-M[i-1])/3$  {kg agua/kg p.s min}

end

"Calores totales"

$Q\_unit\_seco\_total=SUM(Qunit\_seco[1..n])$  {kJ/Kg p.s.}

$Q\_unit\_sensible\_total=SUM(Qunit\_sensible[1..n])$

$Q\_unit\_latente\_total=SUM(Qunit\_latente[1..n])$

"Potencia de bombeo y trabajo impulsión del aire"

$P\_bomb=DeltaP*v\_real*A\_trans/1000$  {Kw}

$W\_impul=P\_bomb*tiempo*60/m\_av\_secas$  {KJ/Kg avellana}

"Energía necesaria J/Kg de avellanas"

"Masa total de aire utilizado en el proceso"

$mai\_total=qmai*tiempo*60/m\_av\_secas$  {Kg de aire/Kg de avellana}

Energia\_calentar\_aire=mai\_total\*(h[0]-h\_ambiente)/1000

"Rendimiento energetico"

rend\_energetico=Q\_unit\_seco\_total/(Energia\_calentar\_aire+W\_impul)

E\_total=W\_impul+Energia\_calentar\_aire

"Exergia"

Duplicate i=1,n

B\_salida[i]=(mai\*cp\_aire\*((TS[i]-T\_o)-  
(T\_o+273)\*Ln((TS[i]+273)/(T\_o+273))))/(m\_av\_secas\*1000) {Exergía del aire a la  
salida del secadero en cada intervalo en KJ/Kg de p.s.}

end

B\_flujo\_aire=Q\_unit\_seco\_total\*(1-(T\_o+273)/(T\_aire+273)) {Exergia KJ/Kg p.s.}

B\_entrada=mai\_total\*cp\_aire\*((T\_aire-T\_o)-  
(T\_o+273)\*Ln((T\_aire+273)/(T\_o+273)))/1000 { Exergía total del aire a la entrada del  
secadero KJ/Kg de p.s.}

B\_salida\_total=SUM(B\_salida[1..n]) {Exergía total del aire a la salida}

"Rendimiento exergetico"

rend\_exergetico=1-(B\_salida\_total/B\_entrada)

"Productividad" {Kg de avellanas secadas/minuto}

$\text{Productividad} = m_{\text{av\_secas}} / \text{tiempo}$

$T_{\text{final\_producto}} = T_{\text{av}}[n]$

$M_{\text{final}} = M[n]$

"Precio Energía"

"Precios industriales"

$P_{\text{gas}} = 0.02 \text{ €/kWh\_termico}$

$P_{\text{electricidad}} = 0.078 \text{ €/kWh\_electrico}$

"Consumo termico"

$\text{Consumo\_termico} = (\text{Energia\_calentar\_aire} * P_{\text{gas}} / 3600)$

$\text{Consumo\_termico\_total} = \text{Consumo\_termico} * m_{\text{av\_secas}}$

"Consumo electrico"

$\text{Consumo\_electrico} = W_{\text{impul}} * P_{\text{electricidad}} / 3600$

$\text{Consumo\_electrico\_total} = \text{Consumo\_electrico} * m_{\text{av\_secas}}$

"Consumo total"

$\text{Consumo\_energetico} = \text{Consumo\_termico} + \text{Consumo\_electrico}$

$\text{Consumo\_energetico\_total} = \text{Consumo\_energetico} * m_{\text{av\_secas}}$

{Caso de saturación: primera etapa de saturación}

"En los intervalos de saturación se modifica el balance de la siguiente forma"

"Se impone la humedad específica para aire saturado (humedad relativa=100%)"

$wt[1]=\text{HumRat}(\text{AirH}_2\text{O}, T=TS[1], r=1, P=1)$

"Balance de masa"

$q_{mai} \cdot 60 \cdot 3 \cdot (wt[1] - wt[0]) = m_{av\_secas} \cdot (M[0] - M[1]) / 100$  {Obtenemos la humedad específica del aire a la salida, Kg de agua/Kg de aire humedo}

$m_{av}[1] = m_{av\_secas} + M[1] / 100 \cdot m_{av\_secas}$  {masa de avellanas en cada intervalo}

$m_{wp}[1] = m_{av\_secas} \cdot (M[0] - M[1]) / 100$  {Kg de agua evaporados en cada intervalo}

"Balance de energia"

$Q_{aire}[1] = m_{ai} \cdot c_{p\_aire} \cdot (T_{aire} - TS[1])$  {Calor total cedido por el aire en J}

$Q_{av}[1] = Q_{aire}[1] - Q_{ag}[1]$  {Balance}

$Q_{ag}[1] = m_{wp}[1] \cdot h_{agvap}[1]$  {Calor de evaporacion del agua}

$Q_{av}[1] = m_{av\_secas} \cdot c_{p\_av} \cdot (T_{av}[1] - T_{av}[0]) + (m_{av}[1] - m_{av\_secas}) \cdot c_{pw} \cdot (T_{av}[1] - T_{av}[0])$  {Obtenemos la temperatura de la avellana en el proceso}

$h_{agvap}[1] = \text{Enthalpy}(\text{Water}, T=T_{av\_media}[1], x=1) - \text{Enthalpy}(\text{Water}, T=T_{av\_media}[1], x=0)$

$(TS[1] - T_{av\_media}[1]) / (T_{aire} - T_{av\_media}[1]) = \exp(-h_{final} \cdot A / (q_{mai} \cdot c_{p\_aire}))$

$T_{av\_media}[1] = (T_{av}[1] + T_{av}[0]) / 2$

"Calor unitario"

$Q_{unit\_seco}[1] = Q_{aire}[1] / (m_{av\_secas} \cdot 1000)$

$Q_{unit\_sensible}[1] = Q_{av}[1] / (m_{av\_secas} \cdot 1000)$

$Q_{unit\_latente}[1] = Q_{ag}[1] / (m_{av\_secas} \cdot 1000)$

"Humedad relativa"

$rh\_s[1]=RelHum(AirH_2O,T=TS[1],w=wt[1],P=1)$  {Humedad relativa del aire a la salida}

{ En el caso de que haya más etapas de saturación se añade el mismo balance para dichas etapas, en este proyecto se llega a saturar en las primeras cuatro etapas, es decir  $i=1,2,3,4$ . El resto del algoritmo queda igual, y el resto de balances y fórmula de Thompson es usado de  $i=5,\dots,n$ }

## ANEXO II

### Algoritmo diseño del intercambiador

---

Diseño de intercambiador de calor"

Intercambiador de placas planas aire-aire

DATOS

Condiciones ambientales: necesarias para cálculos de irreversibilidades

$T_0 = 25$  "°C"

$p_0 = 1$  "bar"

Condiciones del aire para la corriente fría y la corriente caliente

$T_{ce} = 60$  "°C" "Temperatura media de salida del aire en el secadero"

$T_{fe} = T_0$  "°C"

Tomando la eficiencia de 0.67 y siendo ambos calores específicos iguales se calculan las temperaturas de salida para el cálculo de propiedades

$T_{cs} = 36.55$  "°C"

$T_{fs} = 48.45$  "°C"

$T_{cm} = (T_{ce} + T_{cs})/2$  "°C"

$T_{fm} = (T_{fe} + T_{fs})/2$  {°C}

$p_{ce} = 1$  "presión entrada gases en bar"

$p_{fe} = 1$  "presión entrada aire en bar"



## Propiedades

$\rho_c = \text{DENSITY}(\text{Air}, T=T_{cm}, p = p_{ce})$

$\rho_f = \text{DENSITY}(\text{Air}, T=T_{fm}, p = p_{fe})$

$c_{pc} = \text{CP}(\text{Air}, T=T_{cm})$

$c_{pf} = \text{CP}(\text{Air}, T=T_{fm})$

$\mu_c = \text{VISCOSITY}(\text{Air}, T=T_{cm})$

$\mu_f = \text{VISCOSITY}(\text{Air}, T=T_{fm})$

$k_{ac} = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Air}, T=T_{cm})$

$k_{af} = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Air}, T=T_{fm})$

$\text{Pr}_c = 0.7$

$\text{Pr}_f = 0.7$

Determinación número de canales, N, del intercambiador.  $v_c = v_f$  en tabla

$v_c = v_f$

$\dot{m}_c = 0.5 \text{ "Kg/s"}$

$\dot{m}_f = 0.5 \text{ "Kg/s"}$

$A_{canal} = L * 6e-3 \text{ "m}^2\text{"}$  {Se fija la altura de la sección de cada canal}

$\dot{m}_f = \rho_f * v_f * A_{canal} * N/2$  {Caudal, kg/s}

Cálculo de los coeficientes de convección

$D_h = 12e-3 \text{ "Diametro hidraulico, es el doble del ancho del canal"}$

$\text{Re}_c = \rho_c * v_c * D_h / \mu_c \text{ "Número de Reynolds"}$

$\text{Re}_f = \rho_f * v_f * D_h / \mu_f$

"Número de Nusselt"

"Se desprecia el efecto de la entrada y el término corrector será prácticamente 1 por la proximidad de las temperaturas de ambos fluidos"

$\text{Nu}_c = (f_c/8) * (\text{Re}_c - 1000) * \text{Pr}_c / (1 - 2.7 * (f_c/8)^{0.5}) \text{ "0.0214 * (Re}^0.8 - 100) * \text{Pr}^{0.36}"$

$\text{Nu}_f = (f_f/8) * (\text{Re}_f - 1000) * \text{Pr}_f / (1 - 2.7 * (f_f/8)^{0.5})$

"0.

$$h_c = N_{uc} * \lambda_{dac} / D_h \text{ "Coeficiente de convección"}$$

$$h_f = N_{uf} * \lambda_{daf} / D_h$$

"Cálculo área intercambio y dimensión asociada: L "

$$U_f = (1/h_c + 1/h_f)^{-1}$$

$$A_f = \text{factor} * N * L^2 \text{ "cálculo de L"}$$

$$NTU = U_f * A_f / (1000 * m_c * c_{pc})$$

$$NTU=2$$

"Cálculo de las pérdidas de carga y potencia de bombeo de los gases"

$$f_c = (-0.8685 * \ln((1.964 * \ln(Re_c) - 3.8215) / Re_c))^{-2}$$

$$D_{pc} = f_c * 0.5 * \rho_c * v_c^2 * L / D_h \text{ "resultado en Pa"}$$

$$p_{cs} = p_{ce} - D_{pc} / 1e5 \text{ "presión salida fluido caliente, en bar"}$$

$$f_f = (-0.8685 * \ln((1.964 * \ln(Re_f) - 3.8215) / Re_f))^{-2}$$

$$D_{pf} = f_f * 0.5 * \rho_f * v_f^2 * L / D_h \text{ "resultado en Pa"}$$

$$p_{fs} = p_{fe} - D_{pf} / 1e5 \text{ "presión salida fluido frío, en bar"}$$

"Consumo energético"

$$Pot_{\text{bombeo}} = (D_{pf} + D_{pc}) * v_c * N * A_{\text{canal}} \text{ "W"}$$

$$W_{\text{impulsión}} = Pot_{\text{bombeo}} * tiempo_{\text{secado}} / (1000 * m_{\text{av\_secas}}) \text{ "kJ/kg avellana"}$$

$$tiempo_{\text{secado}} = 30 * 60 \text{ "tiempo de secado de las avellanas en el caso óptimo en s"}$$

$$m_{\text{av\_secas}} = 298 \text{ "kg de avellanas secadas en una horanada"}$$

## Resultado tabla intercambiador:

1.8	1 vc [m/s]	2 factor	3 N	4 L [m]	5 Rec	6 Ref	7 Pot <sub>bombeo</sub> [W]	8 W <sub>impulsión</sub> [kJ/kg avellana]	9 Dpc [Pa]	10 Dpf [Pa]	11 NTU
Run 1	5	4	43	0.6894	3325	3545	58.73	0.3547	32.72	33.3	2
Run 2	5.5	4	39.3	0.6859	3658	3899	68.73	0.4151	38.29	38.98	2
Run 3	6	4	36.06	0.6851	3990	4254	79.65	0.4811	44.37	45.18	2
Run 4	6.5	4	33.24	0.6861	4323	4608	91.47	0.5525	50.95	51.89	2
Run 5	5	4.5	48.38	0.6128	3325	3545	52.2	0.3153	29.09	29.6	2
Run 6	5.5	4.5	44.21	0.6096	3658	3899	61.09	0.369	34.04	34.65	2
Run 7	6	4.5	40.57	0.6089	3990	4254	70.8	0.4276	39.44	40.16	2
Run 8	6.5	4.5	37.4	0.6099	4323	4608	81.31	0.4911	45.29	46.12	2

En la tabla se introducen diferentes valores de velocidad de aire y del factor de rugosidad (valores introducidos en negro), y con el algoritmo se obtienen el resto de las variables (valores obtenidos en azul), el intercambiador elegido se muestra en amarillo.

# Anexo III

## Optimización del tiempo de secado.



El primer paso en la optimización del tiempo para cada temperatura, para ello introducimos temperaturas a partir de 100 °C hasta 149°C, con un salto de 5°C en cada temperatura introducida, así observamos el instante en el que la humedad en el producto cumple la especificación requerida, en el caso de las avellanas la humedad necesaria es menor del 1 %, así el tiempo optimo es el mínimo tiempo necesario para obtener dicha humedad.

Las tablas que se muestran a continuación son obtenidas con el programa EES, introduciendo las diferentes temperaturas del aire como dato en el programa diseñado. Los datos que aparecen en las filas son el tiempo en **minutos**, la humedad especifica de la avellana al final de cada intervalo en **kg agua/kg de producto seco**, la temperatura final de la avellana en **°C**, la humedad relativa en cada intervalo en **%**, y la cantidad de agua total evaporada en **kg** para cada intervalo. La columna indica el índice del intervalo. El mínimo tiempo seleccionado se muestra en amarillo.

**T=104°**

Sort	<sup>1</sup> $t_i$	<sup>2</sup> $M_i$	<sup>3</sup> $T_{av_i}$	<sup>4</sup> $rh_{s,i}$	<sup>5</sup> $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.881	19.84	0.9129	3.05
[2]	6	4.576	32.91	0.3593	2.918
[3]	9	4.284	43.7	0.1778	2.79
[4]	12	4.005	52.61	0.1033	2.666
[5]	15	3.738	59.97	0.06734	2.547
[6]	18	3.484	66.06	0.04783	2.432
[7]	21	3.241	71.11	0.03623	2.32
[8]	24	3.01	75.31	0.02882	2.213
[9]	27	2.789	78.81	0.02382	2.109
[10]	30	2.579	81.74	0.02028	2.009
[11]	33	2.379	84.2	0.01768	1.913
[12]	36	2.188	86.28	0.01571	1.82
[13]	39	2.007	88.05	0.01416	1.731
[14]	42	1.835	89.55	0.01293	1.645
[15]	45	1.672	90.85	0.01192	1.563
[16]	48	1.516	91.97	0.01107	1.484
[17]	51	1.369	92.94	0.01036	1.409
[18]	54	1.229	93.8	0.009753	1.337
[19]	57	1.096	94.55	0.009225	1.27
[20]	60	0.97	95.22	0.008767	1.207

**T=110°C**

Sort	<sup>1</sup> $t_i$	<sup>2</sup> $M_i$	<sup>3</sup> $T_{av_i}$	<sup>4</sup> $rh_{s,i}$	<sup>5</sup> $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.853	20.43	0.9635	3.316
[2]	6	4.523	34.06	0.366	3.158
[3]	9	4.208	45.37	0.176	3.006
[4]	12	3.909	54.76	0.09981	2.86
[5]	15	3.624	62.56	0.06377	2.719
[6]	18	3.354	69.06	0.04449	2.583
[7]	21	3.098	74.47	0.03317	2.452
[8]	24	2.854	78.99	0.02602	2.326
[9]	27	2.623	82.79	0.02123	2.206
[10]	30	2.405	85.98	0.01787	2.09
[11]	33	2.198	88.67	0.01541	1.979
[12]	36	2.002	90.96	0.01356	1.872
[13]	39	1.817	92.91	0.01211	1.77
[14]	42	1.642	94.58	0.01096	1.672
[15]	45	1.477	96.03	0.01003	1.579
[16]	48	1.321	97.28	0.009251	1.491
[17]	51	1.173	98.37	0.0086	1.407
[18]	54	1.035	99.33	0.008046	1.328
[19]	57	0.9033	100.2	0.007572	1.254
[20]	60	0.7791	100.9	0.007173	1.187

**T=115°C**

Sort	1 $t_i$	2 $M_i$	3 $T_{av_i}$	4 $rh_{s,i}$	5 $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.826	20.86	1.015	3.576
[2]	6	4.471	34.92	0.3751	3.391
[3]	9	4.135	46.65	0.1762	3.213
[4]	12	3.817	56.43	0.098	3.042
[5]	15	3.515	64.6	0.06154	2.878
[6]	18	3.231	71.43	0.04228	2.721
[7]	21	2.962	77.15	0.03109	2.57
[8]	24	2.708	81.96	0.02408	2.426
[9]	27	2.469	86.01	0.01942	2.288
[10]	30	2.243	89.44	0.01617	2.155
[11]	33	2.031	92.34	0.01381	2.029
[12]	36	1.831	94.82	0.01203	1.909
[13]	39	1.644	96.94	0.01066	1.794
[14]	42	1.467	98.76	0.00957	1.685
[15]	45	1.302	100.3	0.008688	1.581
[16]	48	1.147	101.7	0.00797	1.483
[17]	51	1.001	102.9	0.007363	1.391
[18]	54	0.8645	104	0.006852	1.306
[19]	57	0.7359	104.9	0.006421	1.228
[20]	60	0.6145	105.7	0.006061	1.161

La humedad relativa en el primer intervalo es mayor del 1%, por lo tanto el aire se ha saturado y es necesaria la revisión del algoritmo. Se introduce de nuevo la temperatura del aire para el caso de una etapa de saturación.

**T=115°C, una etapa de saturación:**

Sort	<sup>1</sup> $t_i$	<sup>2</sup> $M_i$	<sup>3</sup> $T_{av_i}$	<sup>4</sup> $mwp_i$	<sup>5</sup> $rh_{s,i}$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.916	21.75	2.717	0.999
[2]	6	4.471	34.74	4.25	0.4339
[3]	9	4.135	46.5	3.213	0.1778
[4]	12	3.817	56.31	3.042	0.09866
[5]	15	3.515	64.5	2.878	0.06185
[6]	18	3.231	71.35	2.721	0.04245
[7]	21	2.962	77.09	2.57	0.03118
[8]	24	2.708	81.91	2.426	0.02414
[9]	27	2.469	85.97	2.288	0.01946
[10]	30	2.243	89.4	2.155	0.01619
[11]	33	2.031	92.31	2.029	0.01382
[12]	36	1.831	94.8	1.909	0.01204
[13]	39	1.644	96.92	1.794	0.01067
[14]	42	1.467	98.75	1.685	0.009575
[15]	45	1.302	100.3	1.581	0.008692
[16]	48	1.147	101.7	1.483	0.007972
[17]	51	1.001	102.9	1.391	0.007365
[18]	54	0.8645	104	1.306	0.006853
[19]	57	0.7359	104.9	1.228	0.006422
[20]	60	0.6145	105.7	1.161	0.006062



**T=120°C, una etapa de saturación:**

Sort	<sup>1</sup> $t_i$	<sup>2</sup> $M_i$	<sup>3</sup> $T_{av_i}$	<sup>4</sup> $rh_{s,i}$	<sup>5</sup> $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.911	22.39	0.999	2.767
[2]	6	4.411	35.45	0.4619	4.774
[3]	9	4.05	47.61	0.1804	3.449
[4]	12	3.711	57.81	0.09805	3.247
[5]	15	3.391	66.37	0.06035	3.054
[6]	18	3.091	73.57	0.04073	2.87
[7]	21	2.809	79.64	0.02946	2.695
[8]	24	2.544	84.76	0.02249	2.527
[9]	27	2.297	89.1	0.01789	2.368
[10]	30	2.065	92.79	0.01471	2.216
[11]	33	1.848	95.93	0.01242	2.072
[12]	36	1.646	98.62	0.0107	1.935
[13]	39	1.457	100.9	0.009388	1.805
[14]	42	1.281	102.9	0.008359	1.683
[15]	45	1.117	104.7	0.007524	1.567
[16]	48	0.9641	106.2	0.006842	1.459
[17]	51	0.8219	107.5	0.006278	1.359
[18]	54	0.6891	108.7	0.00581	1.268
[19]	57	0.5647	109.7	0.005425	1.189
[20]	60	0.4466	110.6	0.005125	1.129

**T=125°C, una etapa de saturación:**

Sort	<sup>1</sup> $t_i$	<sup>2</sup> $M_i$	<sup>3</sup> $T_{av_i}$	<sup>4</sup> $rh_{s,i}$	<sup>5</sup> $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.906	23.01	0.999	2.815
[2]	6	4.341	36.03	0.4977	5.4
[3]	9	3.951	48.57	0.1853	3.719
[4]	12	3.588	59.15	0.09859	3.478
[5]	15	3.248	68.09	0.05949	3.248
[6]	18	2.931	75.66	0.03942	3.03
[7]	21	2.635	82.07	0.02804	2.823
[8]	24	2.36	87.51	0.02106	2.627
[9]	27	2.105	92.15	0.01651	2.442
[10]	30	1.868	96.11	0.01339	2.266
[11]	33	1.648	99.51	0.01116	2.1
[12]	36	1.445	102.4	0.00951	1.944
[13]	39	1.257	104.9	0.008246	1.797
[14]	42	1.083	107.1	0.007258	1.659
[15]	45	0.9229	109	0.00647	1.531
[16]	48	0.7751	110.7	0.005833	1.412
[17]	51	0.6386	112.2	0.005313	1.305
[18]	54	0.5119	113.4	0.004893	1.211
[19]	57	0.3926	114.5	0.004571	1.14
[20]	60	0.2749	115.4	0.004394	1.125

**T=130°C, una etapa de saturación:**

Sort	1 $t_i$	2 $M_i$	3 $T_{av_i}$	4 $rh_{s,i}$	5 $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.901	23.63	0.999	2.861
[2]	6	4.256	36.44	0.5439	6.158
[3]	9	3.834	49.34	0.1931	4.033
[4]	12	3.443	60.3	0.1004	3.739
[5]	15	3.081	69.63	0.05931	3.461
[6]	18	2.746	77.58	0.0385	3.199
[7]	21	2.438	84.36	0.02686	2.952
[8]	24	2.153	90.16	0.01981	2.72
[9]	27	1.891	95.13	0.01526	2.502
[10]	30	1.651	99.39	0.01217	2.297
[11]	33	1.43	103.1	0.009999	2.106
[12]	36	1.229	106.3	0.008393	1.926
[13]	39	1.045	109	0.007181	1.759
[14]	42	0.877	111.4	0.006242	1.604
[15]	45	0.724	113.5	0.005503	1.462
[16]	48	0.5845	115.3	0.004914	1.333

**T=135°C, una etapa de saturación:**

Sort	1 $t_i$	2 $M_i$	3 $T_{av_i}$	4 $rh_{s,i}$	5 $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.896	24.23	0.999	2.907
[2]	6	4.154	36.66	0.604	7.088
[3]	9	3.694	49.88	0.2047	4.398
[4]	12	3.272	61.23	0.1038	4.033
[5]	15	2.886	70.96	0.05982	3.69
[6]	18	2.533	79.32	0.03791	3.371
[7]	21	2.212	86.51	0.02584	3.073
[8]	24	1.919	92.71	0.01864	2.795
[9]	27	1.654	98.05	0.01407	2.536
[10]	30	1.414	102.7	0.01101	2.296
[11]	33	1.197	106.7	0.008871	2.073
[12]	36	1.002	110.1	0.007319	1.868
[13]	39	0.826	113.2	0.006162	1.678
[14]	42	0.6685	115.8	0.005279	1.505
[15]	45	0.5274	118.1	0.004594	1.349
[16]	48	0.4004	120.1	0.004061	1.213

**T=140°C, una etapa de saturación:**

Sort	<sup>1</sup> $t_i$	<sup>2</sup> $M_i$	<sup>3</sup> $T_{av_i}$	<sup>4</sup> $rh_{s,i}$	<sup>5</sup> $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.891	24.82	0.999	2.951
[2]	6	4.028	36.61	0.684	8.251
[3]	9	3.523	50.13	0.2215	4.826
[4]	12	3.067	61.87	0.1092	4.36
[5]	15	2.656	72.05	0.06105	3.93
[6]	18	2.286	80.88	0.03756	3.533
[7]	21	1.954	88.53	0.02489	3.168
[8]	24	1.658	95.18	0.01747	2.832
[9]	27	1.394	101	0.01285	2.523
[10]	30	1.16	106	0.009817	2.241
[11]	33	0.9523	110.4	0.007728	1.983
[12]	36	0.7694	114.2	0.006243	1.748
[13]	39	0.6088	117.5	0.005155	1.535

**T=145°C, una etapa de saturación:**

Sort	<sup>1</sup> $t_i$	<sup>2</sup> $M_i$	<sup>3</sup> $T_{av_i}$	<sup>4</sup> $rh_{s,i}$	<sup>5</sup> $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.887	25.39	0.999	2.994
[2]	6	3.868	36.19	0.7935	9.735
[3]	9	3.311	50.01	0.2458	5.326
[4]	12	2.817	62.17	0.1169	4.716
[5]	15	2.382	72.86	0.06296	4.163
[6]	18	1.999	82.24	0.0373	3.662
[7]	21	1.663	90.46	0.02382	3.208
[8]	24	1.37	97.65	0.01614	2.799
[9]	27	1.116	103.9	0.0115	2.431
[10]	30	0.8961	109.4	0.008512	2.101
[11]	33	0.7072	114.3	0.006515	1.805
[12]	36	0.5458	118.5	0.005129	1.543
[13]	39	0.4088	122.1	0.004139	1.31
[14]	42	0.293	125.3	0.003416	1.107

**T=149°C, una etapa de saturación:**

Sort	<sup>1</sup> $t_i$	<sup>2</sup> $M_i$	<sup>3</sup> $T_{av_i}$	<sup>4</sup> $rh_{s,i}$	<sup>5</sup> $mwp_i$
[0]		5.2	4		
[1]	3	4.883	25.85	0.999	3.028
[2]	6	3.707	35.49	0.9134	11.24
[3]	9	3.102	49.54	0.2732	5.781
[4]	12	2.578	62.11	0.1253	5.006
[5]	15	2.127	73.29	0.06482	4.318
[6]	18	1.739	83.21	0.0369	3.707
[7]	21	1.407	91.98	0.02267	3.166
[8]	24	1.126	99.7	0.01483	2.689
[9]	27	0.8885	106.5	0.01022	2.27
[10]	30	0.6894	112.4	0.007344	1.903
[11]	33	0.5237	117.6	0.005474	1.583
[12]	36	0.3871	122.2	0.004212	1.305

## Anexo IV

### Optimización de la velocidad del aire.

En este anexo se busca la velocidad optima para cada temperatura de secado, para ello introducimos cada temperatura con su correspondiente tiempo optimo, y se disminuye la velocidad hasta encontrar la velocidad optima que es la velocidad mínima para la cual obtenemos la temperatura de 90oC, que a su vez es la menor temperatura dentro de los márgenes de temperatura de tostado para la avellana. Al disminuir su velocidad, el aire va a saturarse más rápidamente a su paso por el secadero por lo que hay que controlar la saturación en los intervalos, y en caso de que el aire se sature introducir esos valores de velocidad en el algoritmo de saturación para ese número de intervalos.

Se muestran las tablas para cada temperatura, y la velocidad optima seleccionada en amarillo.

#### T=104°C

1..6	1 v <sub>aire</sub>	2 T <sub>final,producto</sub>	3 Energía <sub>calentar,a</sub>	4 W <sub>impul</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 rend <sub>exergetico</sub>	7 rend <sub>energetico</sub>	8 rh <sub>s,1</sub>	9 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	87.58	503.1	61.82	564.9	0.7	0.4936	1.628	0.97
Run 2	0.6	89.81	548.9	80.24	629.1	0.662	0.4508	1.439	0.97
Run 3	0.65	91.6	594.6	102	696.6	0.6269	0.4126	1.278	0.97
Run 4	0.7	93.05	640.3	127.4	767.7	0.5945	0.3784	1.139	0.97
Run 5	0.75	94.24	686.1	156.6	842.7	0.5647	0.3478	1.019	0.97
Run 6	0.8	95.22	731.8	190	921.8	0.5373	0.3202	0.9129	0.97

1..6	1 v <sub>aire</sub>	2 T <sub>final</sub>	3 Energía <sub>calentar,a</sub>	4 W <sub>impul</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 rend <sub>exergetico</sub>	7 rend <sub>energetico</sub>	8 rh <sub>s,2</sub>	9 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	87.57	503.1	61.82	564.9	0.7011	0.4936	1.14	0.97
Run 2	0.61	90.18	558	84.31	642.3	0.6557	0.4428	0.8765	0.97
Run 3	0.65	91.59	594.6	102	696.6	0.6277	0.4126	0.7383	0.97
Run 4	0.7	93.05	640.3	127.4	767.7	0.5952	0.3784	0.5973	0.97
Run 5	0.75	94.24	686.1	156.6	842.7	0.5652	0.3478	0.4841	0.97
Run 6	0.8	95.22	731.8	190	921.8	0.5376	0.3202	0.3925	0.97

**T=110°C**

1..6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final,producto</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,1</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	91.37	506.3	57.82	564.1	0.7156	0.5106	1.74	0.9033
Run 2	0.6	93.91	552.3	75.04	627.3	0.678	0.4677	1.534	0.9033
Run 3	0.65	95.97	598.3	95.38	693.7	0.643	0.4292	1.359	0.9033
Run 4	0.7	97.65	644.4	119.1	763.5	0.6106	0.3947	1.208	0.9033
Run 5	0.75	99.04	690.4	146.5	836.8	0.5806	0.3637	1.078	0.9033
Run 6	0.8	100.2	736.4	177.7	914.1	0.553	0.3356	0.9635	0.9033

1..6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	91.35	506.3	57.82	564.1	0.7168	0.5106	1.21	0.9033
Run 2	0.6	93.89	552.3	75.04	627.3	0.6791	0.4677	0.9693	0.9033
Run 3	0.65	95.96	598.3	95.38	693.7	0.644	0.4293	0.7799	0.9033
Run 4	0.7	97.64	644.4	119.1	763.5	0.6114	0.3948	0.6295	0.9033
Run 5	0.75	99.03	690.4	146.5	836.8	0.5813	0.3637	0.5091	0.9033
Run 6	0.8	100.2	736.4	177.7	914.1	0.5534	0.3356	0.4121	0.9033

1..3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	M <sub>final</sub>	rh <sub>s,3</sub>
Run 1	0.5	88.15	460.3	43.46	503.7	0.7583	0.5586	0.9033	0.9777
Run 2	0.54	90.74	497.1	54.73	551.8	0.7258	0.5198	0.9033	0.7369
Run 3	0.55	91.32	506.3	57.82	564.1	0.7179	0.5106	0.9033	0.6856

**T=115°C**

1..6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	93.9	501.4	54.07	555.5	0.7346	0.5294	1.285	0.8645
Run 2	0.6	96.77	547	70.18	617.1	0.6975	0.4863	1.026	0.8645
Run 3	0.65	99.12	592.5	89.2	681.7	0.6627	0.4475	0.8244	0.8645
Run 4	0.7	101	638.1	111.4	749.5	0.6302	0.4125	0.6644	0.8645
Run 5	0.75	102.6	683.7	137	820.7	0.6	0.3808	0.5366	0.8645
Run 6	0.8	104	729.3	166.2	895.5	0.5719	0.3522	0.4339	0.8645

1.3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	M <sub>final</sub>	rh <sub>s,3</sub>
Run 1	0.5	90.33	455.8	40.64	496.4	0.7753	0.5774	0.8645	1.039
Run 2	0.55	93.86	501.4	54.07	555.5	0.7358	0.5294	0.8645	0.7301
Run 3	0.6	96.75	547	70.18	617.1	0.6984	0.4863	0.8645	0.5041

1.3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rh <sub>s,4</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.4	80.64	364.6	20.83	385.5	0.6914	0.8576	2.661	0.8645
Run 2	0.45	85.99	410.2	29.64	439.9	0.6313	0.8159	1.846	0.8645
Run 3	0.5	90.32	455.8	40.64	496.4	0.5776	0.7749	1.265	0.8645

T=120°C

1.6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	93.85	464.5	47.46	512	0.7741	0.5696	1.376	0.9641
Run 2	0.6	97.26	506.7	61.59	568.3	0.7387	0.5257	1.098	0.9641
Run 3	0.65	100.1	549	78.29	627.3	0.705	0.4858	0.8802	0.9641
Run 4	0.7	102.5	591.2	97.76	689	0.673	0.4496	0.7084	0.9641
Run 5	0.75	104.5	633.4	120.2	753.6	0.643	0.4167	0.5717	0.9641
Run 6	0.8	106.2	675.7	145.9	821.5	0.6147	0.3866	0.4619	0.9641

1.4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,3</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.45	84.68	380.1	26.02	406.1	0.8501	0.6712	1.579	0.9641
Run 2	0.5	89.65	422.3	35.67	458	0.8125	0.6178	1.118	0.9641
Run 3	0.55	93.78	464.5	47.46	512	0.7755	0.5694	0.7877	0.9641
Run 4	0.6	97.22	506.7	61.59	568.3	0.7398	0.5256	0.5468	0.9641

1.3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rh <sub>s,4</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.45	84.68	380.1	26.02	406.1	0.6715	0.8496	2.008	0.9641
Run 2	0.51	90.53	430.7	37.85	468.6	0.608	0.8046	1.282	0.9641
Run 3	0.55	93.77	464.5	47.46	512	0.5697	0.775	0.9327	0.9641

1.3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rh <sub>s,4</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.51	90.54	430.7	37.85	468.6	0.6077	0.8048	0.4561	0.9641
Run 2	0.55	93.83	464.5	47.46	512	0.5696	0.7747	0.2466	0.9641
Run 3	0.59	96.67	498.3	58.57	556.9	0.5343	0.7452	0.09195	0.9641



**T=125°C**

1..6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,e</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	95.06	452.7	43.94	496.7	0.7956	0.5937	1.491	0.9229
Run 2	0.6	98.87	493.9	57.02	550.9	0.7615	0.5497	1.187	0.9229
Run 3	0.65	102.1	535	72.48	607.5	0.7287	0.5096	0.9505	0.9229
Run 4	0.7	104.8	576.2	90.5	666.7	0.6973	0.4729	0.7642	0.9229
Run 5	0.75	107.1	617.3	111.3	728.6	0.6676	0.4393	0.6162	0.9229
Run 6	0.8	109	658.5	135	793.5	0.6395	0.4086	0.4977	0.9229

1..3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,e</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	M <sub>final</sub>	rh <sub>s,3</sub>
Run 1	0.5	90.41	411.6	33.02	444.6	0.8325	0.6417	0.9229	1.219
Run 2	0.55	94.97	452.7	43.94	496.7	0.7972	0.5935	0.9229	0.8617
Run 3	0.6	98.81	493.9	57.02	550.9	0.7627	0.5496	0.9229	0.6021

1..3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,e</sub>	W <sub>impul</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rh <sub>s,4</sub>	M <sub>final</sub>	
Run 1	0.4	78.34	329.2	16.93	0.7518	0.9036	1.673	0.9229	
Run 2	0.45	84.88	370.4	24.09	0.6941	0.8686	1.025	0.9229	
Run 3	0.5	90.38	411.6	33.02	0.6415	0.8326	0.5922	0.9229	

**T=130°C**

1..6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,e</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	95.62	438.2	40.5	478.7	0.8183	0.6201	1.636	0.877
Run 2	0.6	99.85	478.1	52.57	530.6	0.7858	0.5761	1.301	0.877
Run 3	0.65	103.5	517.9	66.81	584.7	0.7541	0.5357	1.04	0.877
Run 4	0.7	106.5	557.8	83.43	641.2	0.7236	0.4985	0.8356	0.877
Run 5	0.75	109.2	597.6	102.6	700.2	0.6944	0.4644	0.6734	0.877
Run 6	0.8	111.4	637.4	124.5	761.9	0.6667	0.433	0.5439	0.877

1..4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,e</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	M <sub>final</sub>	rh <sub>s,3</sub>
Run 1	0.5	90.48	398.4	30.44	428.8	0.8533	0.6677	0.877	1.349
Run 2	0.55	95.49	438.2	40.5	478.7	0.8201	0.6198	0.877	0.9573
Run 3	0.6	99.76	478.1	52.57	530.6	0.7872	0.5759	0.877	0.6738
Run 4	0.65	103.4	517.9	66.81	584.7	0.7551	0.5356	0.877	0.4658

1..3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rh <sub>s,4</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.4	77.44	318.7	15.6	334.3	0.7758	0.9189	1.868	0.877
Run 2	0.45	84.45	358.6	22.2	380.8	0.7192	0.8871	1.158	0.877
Run 3	0.5	90.42	398.4	30.44	428.8	0.6674	0.8536	0.6864	0.877

**T=135°C**

1..6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	95.44	421.2	37.15	458.3	0.8419	0.649	1.823	0.826
Run 2	0.6	100.1	459.5	48.22	507.7	0.8113	0.605	1.447	0.826
Run 3	0.65	104.1	497.7	61.29	559	0.7811	0.5644	1.156	0.826
Run 4	0.7	107.6	536	76.53	612.6	0.7518	0.5268	0.9282	0.826
Run 5	0.75	110.6	574.3	94.1	668.4	0.7234	0.4922	0.7478	0.826
Run 6	0.8	113.2	612.6	114.2	726.8	0.6962	0.4601	0.604	0.826

1..4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	M <sub>final</sub>	rh <sub>s,3</sub>
Run 1	0.5	89.79	382.9	27.93	410.8	0.8747	0.6959	0.826	1.517
Run 2	0.55	95.25	421.2	37.15	458.3	0.8439	0.6485	0.826	1.082
Run 3	0.6	99.96	459.5	48.22	507.7	0.813	0.6047	0.826	0.7676
Run 4	0.65	104	497.7	61.29	559	0.7824	0.5642	0.826	0.5373

1..3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rh <sub>s,4</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.45	83.23	344.6	20.37	365	0.7463	0.9057	1.332	0.826
Run 2	0.51	90.85	390.5	29.63	420.2	0.6857	0.869	0.727	0.826
Run 3	0.55	95.24	421.2	37.15	458.3	0.6484	0.8438	0.4557	0.826

**T=140°C**

1..6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	89.51	368.1	31.06	399.2	0.8874	0.7071	2.07	0.9523
Run 2	0.6	94.79	401.6	40.31	441.9	0.8616	0.6636	1.642	0.9523
Run 3	0.65	99.44	435.1	51.23	486.3	0.8354	0.6229	1.31	0.9523
Run 4	0.7	103.5	468.5	63.97	532.5	0.8093	0.5848	1.051	0.9523
Run 5	0.75	107.2	502	78.67	580.7	0.7836	0.5493	0.8466	0.9523
Run 6	0.8	110.4	535.5	95.45	630.9	0.7584	0.5161	0.684	0.9523

1..4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	M <sub>final</sub>	rh <sub>s,3</sub>
Run 1	0.55	89.21	368.1	31.06	399.2	0.8897	0.706	0.9523	1.248
Run 2	0.6	94.55	401.6	40.31	441.9	0.8636	0.6628	0.9523	0.8926
Run 3	0.65	99.26	435.1	51.23	486.3	0.8371	0.6224	0.9523	0.6326
Run 4	0.7	103.4	468.5	63.97	532.5	0.8106	0.5846	0.9523	0.4406

1..3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rh <sub>s,4</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.45	75.93	301.2	17.03	318.2	0.7997	0.9393	1.562	0.9523
Run 2	0.5	82.93	334.7	23.35	358	0.7511	0.9155	0.9711	0.9523
Run 3	0.56	90.28	374.8	32.78	407.6	0.6968	0.8845	0.5095	0.9523

**T=145°C**

1..6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	86.54	345.1	27.9	373	0.9113	0.7433	2.408	0.8961
Run 2	0.6	92.23	376.5	36.21	412.7	0.8885	0.7003	1.907	0.8961
Run 3	0.65	97.29	407.9	46.02	453.9	0.8651	0.6598	1.521	0.8961
Run 4	0.7	101.8	439.2	57.47	496.7	0.8413	0.6218	1.219	0.8961
Run 5	0.75	105.8	470.6	70.66	541.3	0.8175	0.5861	0.9819	0.8961
Run 6	0.8	109.4	502	85.74	587.7	0.794	0.5525	0.7935	0.8961

1..4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	M <sub>final</sub>	rh <sub>s,3</sub>
Run 1	0.59	90.76	370.2	34.43	404.6	0.8955	0.7073	0.8961	1.135
Run 2	0.6	91.86	376.5	36.21	412.7	0.8908	0.699	0.8961	1.063
Run 3	0.65	97.01	407.9	46.02	453.9	0.8671	0.6589	0.8961	0.7626
Run 4	0.7	101.6	439.2	57.47	496.7	0.8429	0.6212	0.8961	0.5408

1...3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,e</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rh <sub>s,4</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.5	79.29	313.7	20.97	334.7	0.7846	0.9361	1.19	0.8961
Run 2	0.55	85.91	345.1	27.9	373	0.7404	0.9141	0.7292	0.8961
Run 3	0.59	90.7	370.2	34.43	404.6	0.7069	0.8954	0.4687	0.8961

**T=149°C**

1...6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,e</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	81.84	318	24.87	342.8	0.9335	0.7806	2.78	0.8885
Run 2	0.6	87.83	346.9	32.28	379.1	0.9143	0.7384	2.199	0.8885
Run 3	0.65	93.23	375.8	41.03	416.8	0.894	0.6985	1.752	0.8885
Run 4	0.7	98.11	404.7	51.23	455.9	0.873	0.6607	1.404	0.8885
Run 5	0.75	102.5	433.6	63	496.6	0.8516	0.6249	1.13	0.8885
Run 6	0.8	106.5	462.5	76.44	538.9	0.8301	0.591	0.9134	0.8885

1...4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,e</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rend <sub>energetico</sub>	M <sub>final</sub>	rh <sub>s,3</sub>
Run 1	0.59	86.14	341.1	30.7	371.8	0.9208	0.7444	0.8885	1.332
Run 2	0.63	90.67	364.2	37.36	401.6	0.9046	0.7124	0.8885	1.029
Run 3	0.65	92.8	375.8	41.03	416.8	0.8962	0.6969	0.8885	0.9036
Run 4	0.7	97.78	404.7	51.23	455.9	0.8749	0.6595	0.8885	0.6494

1...3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V <sub>aire</sub>	T <sub>final</sub>	Energia <sub>calentar,e</sub>	W <sub>impul</sub>	E <sub>total</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rend <sub>exergetico</sub>	rh <sub>s,4</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	80.88	318	24.87	342.8	0.7758	0.9366	0.8959	0.8885
Run 2	0.6	87.16	346.9	32.28	379.1	0.7354	0.9168	0.5362	0.8885
Run 3	0.63	90.66	364.2	37.36	401.6	0.7122	0.9043	0.3767	0.8885

# AnexoV

## Optimización longitud del secadero



La longitud óptima del secadero depende de su velocidad, realizamos una análisis paramétrico de las variables, modificando la velocidad y la longitud al mismo tiempo, variando la velocidades desde 0.75m/s hasta la velocidad optima característica para cada temperatura. Así obtenemos la longitud óptima para dichos valores de velocidad en cada temperatura estudiada.

Un aumento de la longitud supone una mayor saturación del aire, se necesita un control de la humedad relativa a la salida, y en caso de ser mayor de uno, introducir ese rango de velocidad en el algoritmo de saturación para dicho intervalo.

La tabla se muestra en unidades del SI, por fila se encuentra la velocidad del aire en m/s, la longitud del secadero en m, la temperatura final en °C, la masa en Kg, la energía y el trabajo de impulsión en kJ/kg de p.s., el rendimiento en %, y la humedad final en %.

A continuación la longitud óptima para cada velocidad se muestra en amarillo.

**T=104°C**

1..12	1 V <sub>aire</sub>	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentamiento</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,2</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.61	0.7	91.13	277.7	666.2	581.9	84.31	0.4299	0.796	0.97
Run 2	0.61	0.73	90.18	289.6	642.3	558	84.31	0.4428	0.8765	0.97
Run 3	0.61	0.75	89.54	297.5	627.4	543.1	84.31	0.4511	0.9311	0.97
Run 4	0.65	0.73	91.59	289.6	696.6	594.6	102	0.4126	0.7383	0.97
Run 5	0.65	0.75	91.01	297.5	680.7	578.7	102	0.4204	0.7859	0.97
Run 6	0.65	0.78	90.12	309.4	658.5	556.5	102	0.4317	0.8587	0.97
Run 7	0.7	0.8	91.22	317.4	711.7	584.3	127.4	0.4027	0.7407	0.97
Run 8	0.7	0.82	90.67	325.3	697.4	570	127.4	0.4093	0.7828	0.97
Run 9	0.7	0.9	88.41	357	646.7	519.4	127.4	0.434	0.9555	0.97
Run 10	0.75	0.8	92.62	317.4	782.6	626	156.6	0.3701	0.6053	0.97
Run 11	0.75	0.85	91.4	337.2	745.8	589.2	156.6	0.3848	0.6951	0.97
Run 12	0.75	0.9	90.12	357	713.1	556.5	156.6	0.3987	0.787	0.97

**T=110°C**

1..12	1 V <sub>aire</sub>	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentamiento</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,2</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.6	0.8	92.6	317.4	609.5	530.5	78.99	0.4814	1.187	0.7791
Run 2	0.6	0.85	90.74	337.2	578.3	499.3	78.99	0.5006	1.348	0.7791
Run 3	0.6	0.9	88.85	357	550.6	471.6	78.99	0.5186	1.513	0.7791
Run 4	0.65	0.8	94.82	317.4	675.1	574.7	100.4	0.4415	0.9626	0.7791
Run 5	0.65	0.85	93.16	337.2	641.3	540.9	100.4	0.4594	1.098	0.7791
Run 6	0.65	0.93	90.43	368.9	594.8	494.4	100.4	0.4856	1.323	0.7791
Run 7	0.7	0.8	96.64	317.4	744.3	618.9	125.4	0.4057	0.7835	0.7791
Run 8	0.7	0.9	93.64	357	675.5	550.2	125.4	0.4376	1.016	0.7791
Run 9	0.7	1	90.48	396.7	620.5	495.1	125.4	0.4656	1.257	0.7791
Run 10	0.75	0.85	96.83	337.2	778.3	624.1	154.2	0.3885	0.7357	0.7791
Run 11	0.75	0.9	95.47	357	743.6	589.5	154.2	0.4027	0.8349	0.7791
Run 12	0.75	1.08	90.22	428.4	645.4	491.2	154.2	0.4468	1.204	0.7791

Se satura en todas las velocidades y es necesario introducir todos los valores en el algoritmo de dos etapas de saturación:

1..15	1 V <sub>aire</sub>	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,3</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.75	90.46	297.5	550.6	492.8	57.82	0.5198	0.756	0.9033
Run 2	0.55	0.8	88.29	317.4	519.8	462	57.82	0.5419	0.9405	0.9033
Run 3	0.55	0.85	86.09	337.2	492.6	434.8	57.82	0.5624	1.136	0.9033
Run 4	0.6	0.75	93.11	297.5	612.6	537.6	75.04	0.4763	0.528	0.9033
Run 5	0.6	0.8	91.17	317.4	579	504	75.04	0.4969	0.6768	0.9033
Run 6	0.6	0.82	90.39	325.3	566.7	491.7	75.04	0.5048	0.7391	0.9033
Run 7	0.65	0.75	95.28	297.5	677.8	582.4	95.38	0.4373	0.3584	0.9033
Run 8	0.65	0.8	93.55	317.4	641.4	546	95.38	0.4564	0.479	0.9033
Run 9	0.65	0.88	90.69	349.1	591.7	496.3	95.38	0.4845	0.689	0.9033
Run 10	0.7	0.75	97.05	297.5	746.3	627.2	119.1	0.4022	0.2314	0.9033
Run 11	0.7	0.8	95.52	317.4	707.1	588	119.1	0.4199	0.3296	0.9033
Run 12	0.75	1.03	90.23	408.6	635.8	489.3	146.5	0.4494	0.6546	0.9033
Run 13	0.75	0.75	98.52	297.5	818.4	672	146.5	0.3705	0.1358	0.9033
Run 14	0.75	0.8	97.15	317.4	776.4	630	146.5	0.3869	0.2161	0.9033
Run 15	0.75	1.03	90.23	408.6	635.8	489.3	146.5	0.4494	0.6546	0.9033

**T=115°C**

1..15	1 V <sub>aire</sub>	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,3</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.75	92.9	297.5	542.1	488	54.07	0.5387	0.8047	0.8645
Run 2	0.55	0.8	90.48	317.4	511.6	457.5	54.07	0.5609	1	0.8645
Run 3	0.55	0.85	88.05	337.2	484.7	430.6	54.07	0.5816	1.209	0.8645
Run 4	0.6	0.75	95.89	297.5	602.6	532.4	70.18	0.495	0.5637	0.8645
Run 5	0.6	0.8	93.7	317.4	569.3	499.1	70.18	0.5159	0.721	0.8645
Run 6	0.6	0.88	90.15	349.1	523.9	453.7	70.18	0.5464	0.9946	0.8645
Run 7	0.65	0.75	98.34	297.5	665.9	576.7	89.2	0.4557	0.3851	0.8645
Run 8	0.65	0.8	96.38	317.4	629.9	540.7	89.2	0.4752	0.5121	0.8645
Run 9	0.65	0.95	90.29	376.9	544.5	455.3	89.2	0.5263	0.9453	0.8645
Run 10	0.7	0.75	100.4	297.5	732.5	621.1	111.4	0.4201	0.2516	0.8645
Run 11	0.7	0.8	98.62	317.4	693.7	582.3	111.4	0.4383	0.3547	0.8645
Run 12	0.7	1.03	90.03	408.6	563.6	452.3	111.4	0.5074	0.9194	0.8645
Run 13	0.75	0.75	102.1	297.5	802.4	665.5	137	0.3879	0.1514	0.8645
Run 14	0.75	0.8	100.5	317.4	760.8	623.9	137	0.4048	0.2354	0.8645
Run 15	0.75	1.1	90.15	436.4	590.7	453.7	137	0.4846	0.8581	0.8645

**T=120°C**

1..12	1 V <sub>aire</sub>	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,2</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.6	0.8	93.66	317.4	524	462.4	61.59	0.5557	1.351	0.9641
Run 2	0.6	0.85	91.08	337.2	496.8	435.2	61.59	0.5753	1.539	0.9641
Run 3	0.6	0.9	88.52	357	472.6	411	61.59	0.5934	1.734	0.9641
Run 4	0.65	0.8	96.83	317.4	579.2	500.9	78.29	0.5142	1.092	0.9641
Run 5	0.65	0.85	94.45	337.2	549.8	471.5	78.29	0.5327	1.25	0.9641
Run 6	0.65	0.93	90.65	368.9	509.2	430.9	78.29	0.5595	1.513	0.9641
Run 7	0.7	0.8	99.51	317.4	637.2	539.5	97.76	0.4763	0.886	0.9641
Run 8	0.7	0.9	95.13	357	577.3	479.5	97.76	0.5098	1.156	0.9641
Run 9	0.7	1	90.71	396.7	529.3	431.6	97.76	0.5385	1.44	0.9641
Run 10	0.75	0.85	99.8	337.2	664.2	544	120.2	0.4578	0.8327	0.9641
Run 11	0.75	0.9	97.77	357	634	513.8	120.2	0.4729	0.9482	0.9641
Run 12	0.75	1.08	90.36	428.4	548.4	428.2	120.2	0.5185	1.382	0.9641

Se satura en todas las velocidades y es necesario introducir todos los valores en el algoritmo de dos etapas de saturación:

1..15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	V <sub>aire</sub>	L	T <sub>final</sub>	m <sub>av,secas</sub>	E <sub>total</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,3</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.75	92.65	297.5	499.6	452.1	47.46	0.5788	0.8673	0.9641
Run 2	0.55	0.79	90.38	313.4	476.7	429.2	47.46	0.5967	1.034	0.9641
Run 3	0.55	0.85	87.02	337.2	446.4	398.9	47.46	0.6215	1.3	0.9641
Run 4	0.6	0.75	96.19	297.5	554.8	493.2	61.59	0.5345	0.6103	0.9641
Run 5	0.6	0.8	93.59	317.4	524	462.4	61.59	0.5556	0.778	0.9641
Run 6	0.6	0.86	90.48	341.2	491.7	430.1	61.59	0.5788	0.995	0.9641
Run 7	0.65	0.75	99.15	297.5	612.6	534.3	78.29	0.4942	0.4202	0.9641
Run 8	0.65	0.8	96.78	317.4	579.2	500.9	78.29	0.5142	0.5553	0.9641
Run 9	0.65	0.94	90.08	372.9	504.6	426.3	78.29	0.5624	0.9852	0.9641
Run 10	0.7	0.75	101.6	297.5	673.2	575.4	97.76	0.4576	0.2785	0.9641
Run 11	0.7	0.8	99.49	317.4	637.2	539.5	97.76	0.4763	0.3878	0.9641
Run 12	0.7	1	90.62	396.7	529.3	431.6	97.76	0.5383	0.9046	0.9641
Run 13	0.75	0.75	103.7	297.5	736.8	616.5	120.2	0.4241	0.1723	0.9641
Run 14	0.75	0.8	101.8	317.4	698.2	578	120.2	0.4416	0.2611	0.9641
Run 15	0.75	1.07	90.68	424.5	552.4	432.2	120.2	0.5161	0.8516	0.9641

## 125°C

1..12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	V <sub>aire</sub>	L	T <sub>final</sub>	m <sub>av,secas</sub>	E <sub>total</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,2</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.6	0.8	94.85	317.4	507.7	450.7	57.02	0.58	1.464	0.9229
Run 2	0.6	0.85	92	337.2	481.2	424.2	57.02	0.5995	1.671	0.9229
Run 3	0.6	0.91	88.63	361	453.2	396.2	57.02	0.621	1.928	0.9229
Run 4	0.65	0.8	98.38	317.4	560.7	488.2	72.48	0.5383	1.182	0.9229
Run 5	0.65	0.85	95.73	337.2	532	459.5	72.48	0.5569	1.355	0.9229
Run 6	0.65	0.94	91	372.9	488	415.5	72.48	0.5869	1.681	0.9229
Run 7	0.7	0.8	101.4	317.4	616.3	525.8	90.5	0.5	0.9577	0.9229
Run 8	0.7	0.9	96.49	357	557.9	467.4	90.5	0.5339	1.253	0.9229
Run 9	0.7	1.05	89.19	416.5	491.1	400.6	90.5	0.5755	1.725	0.9229
Run 10	0.75	0.85	101.7	337.2	641.5	530.2	111.3	0.4814	0.9005	0.9229
Run 11	0.75	0.9	99.44	357	612	500.7	111.3	0.4968	1.027	0.9229
Run 12	0.75	1.1	90.31	436.4	521	409.7	111.3	0.547	1.558	0.9229

1..15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	V <sub>aire</sub>	L	T <sub>final</sub>	m <sub>av,secas</sub>	E <sub>total</sub>	Energia <sub>calentar,d</sub>	W <sub>impul</sub>	rend <sub>energetico</sub>	rh <sub>s,3</sub>	M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.75	93.71	297.5	484.6	440.6	43.94	0.6029	0.9477	0.9229
Run 2	0.55	0.79	91.21	313.4	462.3	418.3	43.94	0.6207	1.128	0.9229
Run 3	0.55	0.85	87.52	337.2	432.7	388.8	43.94	0.6454	1.417	0.9229
Run 4	0.6	0.75	97.65	297.5	537.7	480.7	57.02	0.5586	0.6704	0.9229
Run 5	0.6	0.8	94.76	317.4	507.7	450.7	57.02	0.5798	0.8513	0.9229
Run 6	0.6	0.86	91.32	341.2	476.2	419.2	57.02	0.603	1.086	0.9229
Run 7	0.65	0.75	101	297.5	593.2	520.8	72.48	0.5181	0.4659	0.9229
Run 8	0.65	0.8	98.32	317.4	560.7	488.2	72.48	0.5382	0.6111	0.9229
Run 9	0.65	0.94	90.88	372.9	488	415.5	72.48	0.5866	1.076	0.9229
Run 10	0.7	0.75	103.8	297.5	651.3	560.8	90.5	0.4809	0.3136	0.9229
Run 11	0.7	0.8	101.4	317.4	616.3	525.8	90.5	0.5	0.4307	0.9229
Run 12	0.7	1.05	89.05	416.5	491.1	400.6	90.5	0.5751	1.147	0.9229
Run 13	0.75	0.75	106.2	297.5	712.2	600.9	111.3	0.4469	0.1997	0.9229
Run 14	0.75	0.8	104	317.4	674.6	563.3	111.3	0.4648	0.2946	0.9229
Run 15	0.75	1.1	90.18	436.4	521	409.7	111.3	0.5467	1.012	0.9229



1..15	1 Vaire	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,4</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.7	96.93	277.7	516.1	472.1	43.94	0.579	0.1978	0.9229
Run 2	0.55	0.73	95.01	289.6	496.7	452.7	43.94	0.5936	0.2992	0.9229
Run 3	0.55	0.75	93.73	297.5	484.6	440.6	43.94	0.6029	0.3711	0.9229
Run 4	0.6	0.8	94.79	317.4	507.7	450.7	57.02	0.5798	0.3022	0.9229
Run 5	0.6	0.85	91.88	337.2	481.2	424.2	57.02	0.5992	0.4673	0.9229
Run 6	0.6	0.88	90.15	349.1	466.7	409.7	57.02	0.6101	0.5739	0.9229
Run 7	0.65	0.8	98.41	317.4	560.7	488.2	72.48	0.5385	0.118	0.9229
Run 8	0.65	0.85	95.7	337.2	532	459.5	72.48	0.5569	0.2462	0.9229
Run 9	0.65	0.95	90.32	376.9	483.6	411.1	72.48	0.5895	0.5414	0.9229
Run 10	0.7	0.85	98.99	337.2	585.3	494.8	90.5	0.5179	0.08894	0.9229
Run 11	0.7	0.9	96.47	357	557.9	467.4	90.5	0.5339	0.2	0.9229
Run 12	0.7	1.02	90.48	404.6	502.9	412.4	90.5	0.5675	0.508	0.9229
Run 13	0.75	0.9	99.5	357	612	500.7	111.3	0.497	0.06508	0.9229
Run 14	0.75	0.95	97.14	376.9	585.7	474.4	111.3	0.511	0.1614	0.9229
Run 15	0.75	1.1	90.15	436.4	521	409.7	111.3	0.5465	0.4974	0.9229

**T=130°C**

1..15	1 Vaire	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,3</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.75	94.11	297.5	467.1	426.5	40.5	0.6292	1.051	0.877
Run 2	0.55	0.79	91.37	313.4	445.5	405	40.5	0.6469	1.249	0.877
Run 3	0.55	0.85	87.35	337.2	416.9	376.4	40.5	0.6712	1.566	0.877
Run 4	0.6	0.75	98.47	297.5	517.9	465.3	52.57	0.5849	0.7483	0.877
Run 5	0.6	0.8	95.26	317.4	488.8	436.2	52.57	0.6061	0.9459	0.877
Run 6	0.6	0.86	91.48	341.2	458.4	405.8	52.57	0.6292	1.203	0.877
Run 7	0.65	0.75	102.2	297.5	570.9	504.1	66.81	0.5442	0.5252	0.877
Run 8	0.65	0.8	99.21	317.4	539.4	472.6	66.81	0.5644	0.6833	0.877
Run 9	0.65	0.94	91	372.9	469	402.2	66.81	0.6128	1.192	0.877
Run 10	0.7	0.75	105.4	297.5	626.3	542.9	83.43	0.5067	0.3594	0.877
Run 11	0.7	0.8	102.6	317.4	592.4	509	83.43	0.526	0.4866	0.877
Run 12	0.7	1.05	89.01	416.5	471.2	387.8	83.43	0.6012	1.27	0.877
Run 13	0.75	0.75	108.2	297.5	684.2	581.7	102.6	0.4722	0.2355	0.877
Run 14	0.75	0.8	105.6	317.4	647.9	545.3	102.6	0.4904	0.3382	0.877
Run 15	0.75	1.1	90.24	436.4	499.2	396.6	102.6	0.5726	1.123	0.877

1..15	1 Vaire	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,4</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.7	97.65	277.7	497.5	457	40.5	0.6053	0.2573	0.877
Run 2	0.55	0.8	90.63	317.4	440.4	399.9	40.5	0.6508	0.656	0.877
Run 3	0.55	0.85	87.24	337.2	416.9	376.4	40.5	0.6707	0.8884	0.877
Run 4	0.6	0.8	95.28	317.4	488.8	436.2	52.57	0.6061	0.3695	0.877
Run 5	0.6	0.85	92.07	337.2	463.1	410.6	52.57	0.6253	0.5487	0.877
Run 6	0.6	0.88	90.17	349.1	449.2	396.6	52.57	0.636	0.6647	0.877
Run 7	0.65	0.8	99.3	317.4	539.4	472.6	66.81	0.5647	0.1686	0.877
Run 8	0.65	0.85	96.28	337.2	511.6	444.8	66.81	0.5831	0.3075	0.877
Run 9	0.65	0.95	90.37	376.9	464.8	398	66.81	0.6155	0.6282	0.877
Run 10	0.7	0.85	99.96	337.2	562.4	479	83.43	0.544	0.1357	0.877
Run 11	0.7	0.9	97.14	357	535.8	452.4	83.43	0.5601	0.2559	0.877
Run 12	0.7	1.02	90.53	404.6	482.6	399.2	83.43	0.5935	0.5904	0.877
Run 13	0.75	0.9	100.5	357	587.3	484.7	102.6	0.523	0.1083	0.877
Run 14	0.75	0.95	97.89	376.9	561.8	459.2	102.6	0.537	0.2125	0.877
Run 15	0.75	1.1	90.17	436.4	499.2	396.6	102.6	0.5723	0.5773	0.877

## T=135oC

1..15	1 V <sub>aire</sub>	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,3</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.75	93.73	297.5	447.1	409.9	37.15	0.6577	1.187	0.826
Run 2	0.55	0.79	90.74	313.4	426.3	389.2	37.15	0.6752	1.406	0.826
Run 3	0.55	0.85	86.4	337.2	398.9	361.7	37.15	0.6992	1.76	0.826
Run 4	0.6	0.75	98.53	297.5	495.4	447.2	48.22	0.6136	0.8501	0.826
Run 5	0.6	0.8	95	317.4	467.5	419.2	48.22	0.6347	1.069	0.826
Run 6	0.6	0.86	90.87	341.2	438.2	390	48.22	0.6575	1.355	0.826
Run 7	0.65	0.75	102.7	297.5	545.8	484.5	61.29	0.5728	0.6029	0.826
Run 8	0.65	0.8	99.35	317.4	515.5	454.2	61.29	0.5931	0.7778	0.826
Run 9	0.65	0.94	90.35	372.9	447.8	386.5	61.29	0.641	1.343	0.826
Run 10	0.7	0.75	106.3	297.5	598.3	521.7	76.53	0.535	0.4195	0.826
Run 11	0.7	0.8	103.2	317.4	565.7	489.1	76.53	0.5544	0.5598	0.826
Run 12	0.7	1	91.06	396.7	467.8	391.3	76.53	0.6168	1.237	0.826
Run 13	0.75	0.75	109.4	297.5	653.1	559	94.1	0.5	0.2824	0.826
Run 14	0.75	0.8	106.5	317.4	618.2	524.1	94.1	0.5185	0.3954	0.826
Run 15	0.75	1.05	92.23	416.5	493.4	399.3	94.1	0.5897	1.103	0.826

1..15	1 V <sub>aire</sub>	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,4</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.7	97.6	277.7	476.4	439.2	37.15	0.634	0.3346	0.826
Run 2	0.55	0.79	90.65	313.4	426.3	389.2	37.15	0.6748	0.7259	0.826
Run 3	0.55	0.85	86.23	337.2	398.9	361.7	37.15	0.6984	1.032	0.826
Run 4	0.6	0.8	94.98	317.4	467.5	419.2	48.22	0.6345	0.457	0.826
Run 5	0.6	0.85	91.46	337.2	442.8	394.6	48.22	0.6535	0.6547	0.826
Run 6	0.6	0.87	90.08	345.1	433.7	385.5	48.22	0.6606	0.7394	0.826
Run 7	0.65	0.8	99.43	317.4	515.5	454.2	61.29	0.5933	0.2343	0.826
Run 8	0.65	0.85	96.08	337.2	488.8	427.5	61.29	0.6115	0.3872	0.826
Run 9	0.65	0.94	90.24	372.9	447.8	386.5	61.29	0.6405	0.703	0.826
Run 10	0.7	0.85	100.2	337.2	536.9	460.4	76.53	0.5724	0.1965	0.826
Run 11	0.7	0.9	97.03	357	511.3	434.8	76.53	0.5884	0.3287	0.826
Run 12	0.7	1	90.97	396.7	467.8	391.3	76.53	0.6163	0.6315	0.826
Run 13	0.75	0.9	100.8	357	559.9	465.8	94.1	0.5512	0.1644	0.826
Run 14	0.75	0.95	97.86	376.9	535.4	441.3	94.1	0.5651	0.2789	0.826
Run 15	0.75	1.08	90.5	428.4	482.3	388.2	94.1	0.5958	0.6231	0.826

## T=140°C

1..15	1 V <sub>aire</sub>	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,4</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.6	101.2	238	479	447.9	31.06	0.6401	0.06206	0.9523
Run 2	0.55	0.64	97.34	253.9	451	419.9	31.06	0.6622	0.1969	0.9523
Run 3	0.55	0.71	90.9	281.7	409.6	378.5	31.06	0.6966	0.4805	0.9523
Run 4	0.6	0.7	97.18	277.7	459.1	418.8	40.31	0.6497	0.1982	0.9523
Run 5	0.6	0.73	94.61	289.6	441.9	401.6	40.31	0.663	0.3002	0.9523
Run 6	0.6	0.78	90.45	309.4	416.2	375.9	40.31	0.6834	0.4898	0.9523
Run 7	0.65	0.75	97.85	297.5	474.7	423.5	51.23	0.6313	0.1686	0.9523
Run 8	0.65	0.85	90.07	337.2	424.9	373.6	51.23	0.6675	0.4923	0.9523
Run 9	0.65	0.9	86.39	357	404.1	352.9	51.23	0.6831	0.6824	0.9523
Run 10	0.7	0.81	97.68	321.3	486.2	422.3	63.97	0.6156	0.1689	0.9523
Run 11	0.7	0.91	90.45	361	439.8	375.9	63.97	0.6466	0.4561	0.9523
Run 12	0.7	0.95	87.69	376.9	424	360	63.97	0.6573	0.5878	0.9523
Run 13	0.75	0.87	97.53	345.1	499.9	421.2	78.67	0.5982	0.167	0.9523
Run 14	0.75	0.93	93.43	368.9	472.7	394	78.67	0.6146	0.3137	0.9523
Run 15	0.75	0.97	90.78	384.8	456.5	377.8	78.67	0.6245	0.4212	0.9523

**T=145°C**

1..15	1 Vaire	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,4</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.68	90.76	269.8	398.4	370.5	27.9	0.7182	0.4755	0.8961
Run 2	0.55	0.79	80.43	313.4	346.8	318.9	27.9	0.764	1.079	0.8961
Run 3	0.55	0.85	75.32	337.2	324.3	296.4	27.9	0.7847	1.476	0.8961
Run 4	0.6	0.75	90.01	297.5	402.7	366.4	36.21	0.7068	0.4987	0.8961
Run 5	0.6	0.8	85.59	317.4	379.7	343.5	36.21	0.7256	0.7275	0.8961
Run 6	0.6	0.85	81.39	337.2	359.5	323.3	36.21	0.7424	0.9835	0.8961
Run 7	0.65	0.81	90.22	321.3	413.6	367.6	46.02	0.6892	0.4742	0.8961
Run 8	0.65	0.85	86.93	337.2	396.3	350.3	46.02	0.7022	0.6335	0.8961
Run 9	0.65	0.94	79.96	372.9	362.8	316.7	46.02	0.7277	1.042	0.8961
Run 10	0.7	0.87	90.4	345.1	426	368.5	57.47	0.6699	0.4493	0.8961
Run 11	0.7	0.9	88.09	357	413.7	356.3	57.47	0.6784	0.5536	0.8961
Run 12	0.7	0.95	84.37	376.9	395	337.5	57.47	0.6912	0.741	0.8961
Run 13	0.75	0.88	94.27	349.1	461	390.4	70.66	0.6363	0.2821	0.8961
Run 14	0.75	0.93	90.56	368.9	440.1	369.4	70.66	0.6493	0.4236	0.8961
Run 15	0.75	0.98	86.98	388.8	421.2	350.5	70.66	0.6609	0.5792	0.8961

**T=149°C**

1..15	1 Vaire	2 L	3 T <sub>final</sub>	4 m <sub>av,secas</sub>	5 E <sub>total</sub>	6 Energia <sub>calentar,d</sub>	7 W <sub>impul</sub>	8 rend <sub>energetico</sub>	9 rh <sub>s,4</sub>	10 M <sub>final</sub>
Run 1	0.55	0.6	94.93	238	411.7	386.9	24.87	0.7159	0.2281	0.8885
Run 2	0.55	0.64	90.36	253.9	387.6	362.7	24.87	0.7364	0.4044	0.8885
Run 3	0.55	0.7	83.92	277.7	356.5	331.6	24.87	0.7636	0.7176	0.8885
Run 4	0.6	0.7	90.17	277.7	394	361.7	32.28	0.7233	0.4029	0.8885
Run 5	0.6	0.73	87.16	289.6	379.1	346.9	32.28	0.7354	0.5362	0.8885
Run 6	0.6	0.75	85.22	297.5	369.9	337.6	32.28	0.743	0.6316	0.8885
Run 7	0.65	0.75	90.96	297.5	406.8	365.8	41.03	0.7046	0.3605	0.8885
Run 8	0.65	0.85	81.96	337.2	363.8	322.7	41.03	0.7372	0.7835	0.8885
Run 9	0.65	0.9	77.81	357	345.8	304.8	41.03	0.7509	1.033	0.8885
Run 10	0.7	0.81	90.75	321.3	415.9	364.7	51.23	0.6881	0.3564	0.8885
Run 11	0.7	0.9	83.18	357	379.5	328.2	51.23	0.7133	0.6904	0.8885
Run 12	0.7	0.95	79.27	376.9	362.2	311	51.23	0.7252	0.9041	0.8885
Run 13	0.75	0.87	90.58	345.1	426.8	363.8	63	0.6697	0.3489	0.8885
Run 14	0.75	0.93	85.8	368.9	403.3	340.3	63	0.6844	0.5402	0.8885
Run 15	0.75	0.95	84.26	376.9	396.2	333.2	63	0.6888	0.6091	0.8885

## ANEXO VI

Artículo: Murat Ozdemir, Y.  
Onur Devres, *The thin layer  
drying characteristics of  
hazelnuts during roasting*,  
Journal of Food Engineering,  
1999, 225-233.

---

## **ANEXO VII**

Artículo: Albert B. Newman,  
The Drying of Porous Solids.

---

# Glosario

---

**Aire seco:** mezcla de gases que resulta al retirar el aire del aire atmosférico todos los productos contaminantes y el vapor de agua.

**Aire húmedo:** mezcla binaria de aire seco y vapor de agua. Su estado viene determinado por su temperatura, presión, y humedad.

**Aire saturado:** la cantidad de vapor de agua en el aire húmedo puede variar desde cero (aire seco) hasta una cantidad máxima que depende de la temperatura y de la presión. Cuando el aire húmedo contiene la máxima cantidad de vapor de agua admisible, ya que cualquier exceso se condensaría instantáneamente), se dice que el aire está saturado. A la mezcla de aire saturado y agua líquida se conoce como niebla.

**Temperatura de rocío:** si a presión constante se enfría el aire húmedo se llega a una temperatura en que se satura; dicha temperatura de rocío o punto de rocío.

**Presión parcial:** En una mezcla de gases, se denomina presión parcial de un componente a la presión que ejercería ese componente si ocupase el sólo todo su volumen que ocupa la mezcla. Para el aire húmedo se tiene:

$$p = p_{agua} + p_{aire,seco}$$

Donde  $p$  es la presión atmosférica, que es igual a la presión parcial que ejerce el vapor de agua más la presión del aire seco.

**Humedad específica:** es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco.

$$w = \frac{m_{agua}}{m_{aire,seco}}$$

Tomamos como referencia la masa de aire seco, ya que permanece constante en los diferentes procesos psicométricos.

**Humedad relativa:** se define como el cociente entre la fracción molar del vapor de agua en la muestra y la que tendría en el aire saturado a la misma presión y temperatura.

$$\phi = \frac{P_{agua}}{P_{agua,saturada}}$$

**Volumen específico:** es el volumen de aire húmedo por unidad de masa de aire seco.

$$v = \frac{V}{m_{\text{aire}}}$$

**Entalpia específica:** la entalpia del aire húmedo es la mezcla de las entalpias de sus componentes:

$$H = m_{\text{aire}} h_{\text{aire}} + m_{\text{agua}} h_{\text{agua}}$$

Y tomando como referencia tanto para el aire seco como para el agua líquida,  $h=0$  y  $T=0^\circ\text{C}$ .

$$h = c_{p\text{aire}} T + w(c_{p\text{agua}} T + h_{\text{vaporización}}) = c_{p\text{aire}} + w c_{p\text{agua}} T + w h_{\text{vaporización}}$$

**Calor específico:** es el calor necesario para aumentar en un grado la temperatura de un kilogramo de masa de cualquier sustancia (J/Kg K).

**Calor sensible:** es el calor que aumenta la temperatura de los cuerpos, se puede calcular si es a presión constante:

$$Q_{\text{sensible}} = c_{p,\text{material}} \Delta T_{\text{material}}$$

Si es a volumen constante:

$$Q_{\text{sensible}} = c_{v,\text{material}} \Delta T_{\text{material}}$$

Siendo  $c_p$ , y  $c_v$ , el calor específico a presión y a volumen constante respectivamente.

**Calor latente:** es el calor empleado o requerido para el cambio de estado de una sustancia, en el caso de la vaporización del agua:

$$Q_{\text{latente}} = m_{\text{agua}} L_{\text{vaporización}}$$

# Nomenclatura

---

$c_p$	calor específico a presión constante [J/kg K, kJ/kg °C]
$D_o$	constante de difusión, equivalente a la difusión a una temperatura infinitamente alta [m <sup>2</sup> /s]
$D$	difusión efectiva en [m/s <sup>2</sup> ]
$D_p$	diámetro del producto [m]
$E_a$	energía de activación [kJ/kg]
$\epsilon$	porosidad [adimensional]
$h$	entalpía de una sustancia [kJ/kg] coeficiente de convección del calor [W/m <sup>2</sup> K]
$L$	longitud [m]
$M_i$	Humedad observada [kg de agua/kg de p.s.]
$M_{pri}$	Humedad teórica [kg de agua/kg de p.d.]
$m$	masa [kg]
$\dot{m}$	caudal másico [kg/s]
$n$	número de medidas
$P$	presión [bar, Pa]
$Q$	calor [kJ, J]
$R$	radio del producto a secar [m]
$R_g$	constante universal de los gases [8.3143 kJ/mol]
$S$	superficie [m <sup>2</sup> ]
$t$	tiempo [s, minutos]
$T$	temperatura [°C, K]
$v$	velocidad del aire [m/s]
$V$	volumen [m <sup>3</sup> ]



$U$	coeficiente global de transferencia de calor [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
$\dot{W}$	potencia [ $\text{W}$ , $\text{kW}$ ]
$W$	trabajo mecanico [ $\text{kJ}$ ]
$w$	humedad especifica del aire [ $\text{kg agua}/\text{kg aire seco}$ ]
$\nu$	viscosidad cinematica [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\mu$	viscosidad dinamica [ $\text{Pa s}$ ]
$\rho$	densidad del aire [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]
$\lambda$	conductividad de termica [ $\text{W}/\text{mK}$ ]
$\eta$	rendimiento (%)

# Bibliografía

---

- T.L. Thompson, R.M. Peart and G.H. Foster, *Mathematical simulation of corn Drying- a new model*, Transactions of the ASAE, 1968, 582-586.
- D.S. Boyce, *Grain Moisture and temperature changes with position and time during through drying*, 333-341.
- D.A. Coleman and H.C. Fellows, *Hygroscopic moisture of cereal grains and flaxseed exposed to atmospheres of different relative humidity*, 1925, 275-287.
- Mortaza Aghbashlo, Mohammad H. Kianmehr et al., *Influence of drying conditions on the effective diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit*, Energy Conversion and Management, 2008, 2865-2871.
- Ratthasak Prommas, Phadungsak Rattanadercho et al., *Energy and exergy analyses in drying process of porous media using hot air*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 372-378.
- Murat Ozdemir, Y. Onur Devres, *The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting*, Journal of Food Engineering, 1999, 225-253.
- Ali Dogan Demir, Jesús María Frías Celayeta et al., *Modelling of the kinetics of colour change in hazelnuts during air roasting*, Journal of Food Engineering, 2002, 283-292.
- Hakan Kibar, Tugut Ozturk, *The effect of moisture content on the physic-mechanical properties of some hazelnut varieties*, Journal of Stored Products Research, 2009, 14-18.
- Albert B. Newman, *The Drying of porous solids diffusion calculations*, 310-333.
- M.J. Lewis, *Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado*, Acribia S.A., 1993.
- J.P. Holman, *Transferencia de calor*, Mc Graw Hill, 1998.