

Trabajo Fin de Grado

ANEXOS

Diseño de un secadero de poda de moringa para la
producción de pélets.

Design of a moringa pruning dryer for pellet
processing.

Pablo Ferrando Ginés

Francisco Javier Royo Herrero

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2023



INDICE DE CONTENIDOS

ANEXO 1. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE PRESIÓN CON EES	3
ANEXO 2. CÁLCULO DE LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN CON EES.....	5
ANEXO 3. CÁLCULO DEL SECADO DE BIOMASA CON EES.....	7
3.1 CÁLCULO DEL SECADO DE DOS BANDEJAS.....	7
3.2 CÁLCULO DEL SECADERO COMPLETO	10
3.3. CÁLCULO DE MEDIAS Y VARIACIÓN DE PARÁMETROS	13

ANEXO 1. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE PRESIÓN CON EES

En este anexo se reproduce el código empleado en EES, con la explicación de cada formula, con el objetivo de cuantificar las pérdidas de presión en todo el secadero y elegir un ventilador que se ajuste tanto a la demanda de caudal como a las pérdidas de presión. Para ello se ha recurrido a la ecuación de Ergún que muestra las caídas de presión de un fluido al atravesar lechos porosos.

Primeramente, se definen las condiciones de funcionamiento. Que pueden variarse y ver cómo afectan a las pérdidas totales.

"PERDIDAS DE PRESIÓN EN UN SECADERO DE BIOMASA"

"VENTILADOR SODECA CAM-D545-2T-3 "

"DATOS DE PARTIDA (En sistema internacional)"

"Conversión de unidades"

g_c= 1

"Datos atmosféricos"

T0=25 "°C"

P0=101325 "Pa"

rho_0=Density(Air,T=T0,P=P0)

Q_ventilador0=2300/3600 "m³/s"

M_ventilador=Q_ventilador0*rho_0 "kg/s" "El flujo másico es constante, el caudal no lo es"

P_ventilador=2,2*10³ "W"

"Datos entrada de aire y ventilador"

T[1]=100 "°C"

P[1]=(P0) "Pa"

Dpt[1]=0

"Datos geométricos"

L=0,06 "altura de lecho"

d_e= 0,03 "m" "diametro equivalente de partícula"

phi= 0,75 "esfericidad partículas"

rho_madera=500 "kg/m³"

"Calculo de porosidad"

epsilon= (V_T- V_R)/V_T "Porosidad"

V_T=2*2*L

V_R=0,55*V_T

A continuación, se muestra la iteración entre bandejas de las pérdidas.

"Utilizamos la función de ARRAY en EES para simular el comportamiento de todo el secadero"

Duplicate j=2;13

T[j]=T[j-1]-5

P[j]=P[j-1]-Delta_P[j-1]

mu[j-1]=Viscosity(Air,T=T[j-1])

rho[j-1]= Density(Air,T=T[j-1],P=P[j-1])

Re_mf[j-1]=rho[j-1]*d_e*V[j-1]/mu[j-1]

Ar_mf[j-1]=9,8*d_e³*rho[j-1]*(rho_madera-rho[j-1])/(mu[j-1]²)

Ar_mf[j-1]=((150*(1-epsilon)*Re_mf[j-1])/(epsilon³))+((1,75*Re_mf[j-1]²)/(epsilon³))

"La velocidad se verá afectada también por el caudal"

Delta_P[j-1]/L=((150*(1-epsilon)²*mu[j-1]*V[j-1])/(g_c*epsilon³*phi²*d_e²))+((1,75*(1-epsilon)*V[j-1]²*rho[j-1])/(g_c*epsilon³*phi*d_e)) "Los parámetros anteriores afectarán a la pérdida de presión"

Dpt[j]=Dpt[j-1]+Delta_P[j-1]

End

DPT=Dpt[13]

"La temperatura bajará 5°C por escalón"

"La presión es la inicial menos la diferencia de la pérdida"

"La viscosidad se ve afectada por la bajada de T"

"La densidad bajará por que la bajada de la T y la P"



Por último, se muestran los resultados de cálculo en la iteración de las bandejas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Sort	$Ar_{mf,i}$ [dim*(1/dim)]	$\delta_{p,i}$	$D_{pt,i}$	μ_i	P_i	$Re_{mf,i}$	ρ_i	T_i
[1]		2,626E+08	216,1	0	0,00002181	101325	3675	0,946	100
[2]		2,708E+08	216,1	216,1	0,0000216	101109	3732	0,9568	95
[3]		2,795E+08	216,1	432,2	0,00002139	100893	3791	0,9679	90
[4]		2,885E+08	216	648,2	0,00002117	100677	3852	0,9794	85
[5]		2,979E+08	216	864,3	0,00002096	100461	3915	0,9911	80
[6]		3,079E+08	216	1080	0,00002074	100245	3981	1,003	75
[7]		3,184E+08	216	1296	0,00002052	100029	4048	1,016	70
[8]		3,294E+08	216	1512	0,0000203	99813	4118	1,028	65
[9]		3,410E+08	215,9	1728	0,00002008	99597	4190	1,042	60
[10]		3,532E+08	215,9	1944	0,00001986	99381	4265	1,055	55
[11]		3,661E+08	215,9	2160	0,00001963	99165	4343	1,069	50
[12]		3,797E+08	215,9	2376	0,00001941	98949	4423	1,084	45
[13]				2592		98733			40

Las pérdidas totales se van sumando, siendo la variable $D_{pt}[13]$ el conjunto de pérdidas totales en el secadero.



ANEXO 2. CÁLCULO DE LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN CON EES

En este anexo se muestran los tres modelos utilizados para el cálculo de las isotermas de sorción y la humedad de equilibrio para utilizarse después en el cálculo del secado de la biomasa.

Primeramente, se definen las condiciones iniciales de humedad y temperatura. Que variarán a la hora de realizar las isotermas de sorción.

A continuación, se exponen los modelos con los que se ha trabajado.

CÁLCULO DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LA PODA DE MORINGA A $T_g = 100^\circ\text{C}$

"Datos de entrada"

$T_g = 100^\circ\text{C}$

$T_g1 = 25 + 273,15$

$\chi = 0,3 \text{ "kg agua/kg biomasa seca"}$

"Fórmula de cálculo de la Humedad de equilibrio Hailwood and Horrobin (1946)" "Dos términos"

$$X_{peH} = (18/M_p) * ((K1 * \chi) / (1 - (K1 * \chi))) + (K1 * K2 * \chi + 2 * K1^2 * K2 * K3 * \chi^2) / (1 + (K1 * K2 * \chi) + K1^2 * K2 * K3 * \chi^2))$$

$$K1 = -3,3289 * 10^{(-8)} * (T_g + 273,15)^2 + 0,00047238 * (T_g + 273,15) + 0,68405$$

$$K2 = 4,05 * 10^{(-5)} * (T_g + 273,15)^2 - 0,0587818 * (T_g + 273,15) + 19,641$$

$$K3 = -0,000006414 * (T_g + 273,15)^2 + 0,0016795 * (T_g + 273,15) + 2,6172$$

$$M_p = 0,00039605 * (T_g + 273,15)^2 + 2,151 * (T_g + 273,15) - 417,03$$

"Fórmula de cálculo de la Humedad de equilibrio García (2002)" "Válida hasta $T_g = 200^\circ\text{C}$ "

$$X_{peG} = \alpha * ((b/\chi)^d - 1)^{(-1/c)}$$

$$\alpha = a1 * \exp(-((T_g + a2)/a3)^{a4})$$

$$a1 = 1865,75 * 10^{(-4)}$$

$$a2 = 1025$$

$$a3 = 1163,31$$

$$a4 = 12,7441$$

$$b = 1,09603$$

$$c = 2,36069$$

$$d = 1,84447$$

"Fórmula de cálculo de la Humedad de equilibrio Day y Nelson (1965)"

$$X_{peD} * 100 = (\ln(1 - \chi) / (b1 * T_g^{b2}))^{(1 / (b3 * T_g^{b4}))}$$

$$b1 = -3,4 * 10^{(-17)}$$

$$b2 = 5,98$$

$$b3 = 3 * 10^2$$

$$b4 = -0,93$$



Finalmente se muestran los resultados de cálculo de las isothermas de sorción variando los parámetros de entrada.

1..13	1	2
	Tg	X _{peG}
Run 1	130	0,02835
Run 2	125	0,02977
Run 3	120	0,0312
Run 4	115	0,03261
Run 5	110	0,03401
Run 6	105	0,0354
Run 7	100	0,03677
Run 8	95	0,03811
Run 9	90	0,03944
Run 10	85	0,04074
Run 11	80	0,04201
Run 12	75	0,04326
Run 13	70	0,04447

1..10	1	2	3	4
	z	X _{peD}	X _{peG}	X _{peH}
Run 1	0,01	0,04039	0,002476	0,001534
Run 2	0,1189	0,07446	0,01725	0,01908
Run 3	0,2278	0,08848	0,02916	0,03605
Run 4	0,3367	0,09893	0,04065	0,05194
Run 5	0,4456	0,108	0,05257	0,06771
Run 6	0,5544	0,1165	0,06573	0,08492
Run 7	0,6633	0,1252	0,08124	0,106
Run 8	0,7722	0,1348	0,1012	0,1353
Run 9	0,8811	0,1472	0,1308	0,1837
Run 10	0,99	0,1774	0,1895	0,2871

ANEXO 3. CÁLCULO DEL SECADO DE BIOMASA CON EES.

En este anexo se desarrolla el modelado matemático del secadero de biomasa sobre el programa EES. Como el secadero se ha evaluado desde distintas perspectivas, en cada subapartado se expondrá cada uno de los modelos realizados.

3.1 CÁLCULO DEL SECADO DE DOS BANDEJAS

En primer lugar, se expone el modelo matemático realizado a dos bandejas. Este modelo tiene el objetivo de asegurar que el secadero funciona correctamente y se asemeja a la teoría. Se han establecido periodos de iteración de 100 segundos.

En primer lugar, se exponen las condiciones iniciales que serán comunes a todas las bandejas.

```
"Condiciones iniciales"
Tg=100 "°C"
Pg=101325 "Pa"
T0=25 "°C" "Temperatura ambiente"

Q_ventilador=2300/3600 "m³/s"
rho_0=Density(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)"kg/m³"
M_ventilador=Q_ventilador*rho_0 "kg/s"
w1[1]=0,01 "Hum. especifica aire"

epsilon=(V_T- V_R)/V_T "Porosidad"
V_T=2*2*L
V_R=0,7*V_T
L=0,1 "m"

d_e= 0,03 "m" "diametro equivalente de particula"
A_contacto=2*2*0,7 "m²"

ms=17 "kg biomasa seca, se necesitan 200 kg al día y hay 12 bandejas "
```

A continuación, se expone la bandeja 1, esta bandeja a la hora de programar tiene la peculiaridad de que las condiciones de entrada se suponen constantes y se programa de manera distinta al resto en todos los modelos.

```
"/"BANDEJA 1"
rr1_0=0,3 "Humedad relativa inicial"
rr1[1]=rr1_0
Tb1[1]=T_bc1[1]
t_tc1=100 "Intervalos de 100 segundos en todas las bandejas"

Tb_01[1]=T0

cp_c1=Cp(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)
k_c1=Conductivity(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)

cpb=2893,4 "J/kgK" "Es el calor específico de la madera promedio"
T_bnc1[1]=WetBulb(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)
T_bc1[1]=WetBulb(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg) "Es la temperatura de bulbo húmedo que irá aumentando"
rho_madera=500 "kg/m³"

"Estos parámetros no cambian"
mu_c1=viscosity(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)
rho_c1= Density(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)
Lv_wc1=Enthalpy_vaporization(Steam,T=T_bc1[1])+1,82*(Tg-T_bc1[1]) "J/kg"

"Humedad de equilibrio y saturación de fibras"
X_eg1=0,036 "kg agua/kg seco"
X_pfs=0,2377

"Calculo velocidad del aire seco"
Re_c1=rho_c1*d_e*V_c1/mu_c1
Ar_c1=9,8*d_e^3*rho_c1*(rho_madera-rho_c1)/(mu_c1^2) "A partir del número de Arquimedes conocemos los Reynolds del fluido"
Ar_c1=((150*(1-epsilon)*Re_c1)/(epsilon^3))+((1,75*Re_c1^2)/(epsilon^3))

"Calculamos el coeficiente de convección, que es el principal modo de transferencia"
Pr_c1=mu_c1*cp_c1/k_c1
Nusselt_cilc1=0,3+(0,62*Re_c1^(1/2)*Pr_c1^(1/3))/((1+0,4/(Pr_c1^(2/3)))^(1/4))*((1+(Re_c1/282000)^(5/8))^(4/5)) "Tabla 1 p.50"
h_conv1=Nusselt_cilc1*k_c1/d_e

"Balances de energía de la partícula en la bandeja 1 periodo secado constante"
M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Tg,w=w1[1])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=T_a_c2[1],w=Wa_c2[1]))=h_conv1*A_contacto*(Tg-T_bc1[1])
```



```
"Calentamiento de la partícula"

"Balance de energía fluido-biomasa"

Q_t01=h_conv1*A_contacto*(Tg-Tb1[1])
Q_t01=M_ventilador*cp_c1*(Tg-Ta10)

Duplicate j=2;12

Tb_01[j]=Tb_01[j-1]+1 "Iteración de un grado de temperatura en la biomasa"

1-f01[j-1]=((Tb_01[j-1]-Tb1[1])/(T0-Tb1[1])) "Coeficiente de temperaturas"

Q_t01*f01[j-1]=ms*cp_c1*(Tb_01[j-1]-T0)/t_01[j-1] "Cantidad de energía invertida en calentar la biomasa"

"Secado de biomasa"

rr1_0-r_c10[j-1]=f01[j-1]*h_conv1*A_contacto/(ms*Lv_wc1)*(Tg-Tb1[j-1])*t_01[j-1]

END

"De 29% humedad a 23% humedad////////////////////////////////////SECADO CONSTANTE"
Duplicate j=2;50

"Secado de biomasa"

rr1[j-1]-r_c1[j]=h_conv1*A_contacto/(ms*Lv_wc1)*(Tg-Tb1[j-1])*t_tc1

"Balances de masa de la partícula en la bandeja 1 periodo secado constante"

ms*(rr1[j-1]-r_c1[j])=t_tc1*M_ventilador*(Wa_c2[j-1]-W1[1])

////////////////////////////////////SECADO NO CONSTANTE"
"La temperatura de biomasa empieza en bulbo húmedo y luego aumenta"
"Calculo de Q, Tgs, Tb1 a partir de los balances de energía"

Q_nc1[j-1]=h_conv1*A_contacto*(Tg-Tb1[j-1])
Q_nc1[j-1]=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Tg,w=w1[1])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta_nc2[j-1],w=Wa_nc2[j-1]))
Q_nc1[j-1]*(1-f[j-1])= ms*cpb*(T_bnc1[j]-Tb1[j-1])/t_tc1

f[j-1]=((rr1[j-1]-X_eg1)/(X_pfs-X_eg1))^(1/2)

"Balance de masa de agua"

ms*(rr1[j-1]-r_nc1[j])=M_ventilador*t_tc1*(Wa_nc2[j-1]-W1[1])

"Cálculo de la entalpía de vaporización del agua"

Lv_wnc1[j-1]=Enthalpy_vaporization(Steam,T=Tb1[j-1])+1,82*(Tg-Tb1[j-1]) "J/kg"

"Calculo de la humedad final del intervalo"

rr1[j-1]-r_nc1[j]=f[j-1]*h_conv1*A_contacto/(ms*Lv_wnc1[j-1])*(Tg-Tb1[j-1])*t_tc1

"Condicionales"

rr1[j]=if(r_c1[j],0.23;r_nc1[j]);r_c1[j]=r_c1[j]
Tb1[j]=if(r_c1[j],0.23;T_bnc1[j-1]);T_bc1[1]=T_bc1[1]
Ta2[j]=if(r_c1[j],0.23;Ta_nc2[j-1]);Ta_c2[1]=Ta_c2[1]
Wa2[j]=if(r_c1[j],0.23;Wa_nc2[j-1]);Wa_c2[j-1];Wa_c2[j-1])

END
```

Una vez la primera bandeja está completamente definida, los datos extraídos de los condicionales son los datos de entrada de la siguiente bandeja. A continuación, se muestra el cálculo del modelo matemático en la segunda bandeja.

```
////////////////////////////////////BANDEJA 2"

////////////////////////////////////CALENTAMIENTO"

Tb_02[1]=T0
rr2_0=0,3
rr2[1]-r_c20[10]
Tb2[1]=T_bc2[1]

"Calentamiento de la partícula"

Q_t02=h_conv1*A_contacto*(Ta2[2]-Tb2[1])
Q_t02=M_ventilador*cp_c1*(Ta2[2]-Ta20)
|
Duplicate j=2;11

Tb_02[j]=Tb_02[j-1]+1

1-f02[j-1]=((Tb_02[j-1]-Tb2[1])/(T0-Tb2[1]))

Q_t02*f02[j-1]=ms*cp_c1*(Tb_02[j-1]-T0)/t_02[j-1]

rr2_0-r_c20[j-1]=f02[j-1]*h_conv1*A_contacto/(ms*Lv_wc2[1])*(Ta2[2]-Tb_02[j-1])*t_02[j-1]

END
```




```
"////////////////////SECADO CONSTANTE"

X_eg2=X_eg1
T_bnc2[1]=WetBulb(AirH2O,T=Ta2[2],w=Wa2[2],P=Pg)

Duplicate j=2,50

Lv_wc2[j-1]=Enthalpy_vaporization(Steam,T=T_bc2[j-1])+1.82*(Ta2[j]-T_bc2[j-1]) "J/kg"

T_bc2[j-1]=WetBulb(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg) "Es la temperatura de bulbo húmedo que irá aumentando ya que la temperatura de gas aumenta"

"Estos parámetros cambian"
|
mu_c2[j-1]=viscosity(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)
rho_c2[j-1]= Density(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)

"Calculo velocidad del aire seco"

Re_c2[j-1]=rho_c2[j-1]*d_e*V_c2[j-1]/mu_c2[j-1]
Ar_c2[j-1]=9.8*d_e^3*rho_c2[j-1]*(rho_madera-rho_c2[j-1])/(mu_c2[j-1]^2)
A_r_c2[j-1]=((150^(1-epsilon)*Re_c2[j-1])/(epsilon^3))+((1.75*Re_c2[j-1]^2)/(epsilon^3))

"Calculamos el coeficiente de convección, que es el principal modo de transferencia"

cp_c2[j-1]=Cp(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)
Pr_c2[j-1]=mu_c2[j-1]*cp_c2[j-1]/k_c2[j-1]
k_c2[j-1]=Conductivity(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)

Nusselt_cilc2[j-1]=0.3+(0.62*Re_c2[j-1]^(1/2)*Pr_c2[j-1]^(1/3))/(1+0.4/(Pr_c2[j-1]^(2/3)))^(1/4)*(1+(Re_c2[j-1]/282000)^(5/8))^(4/5)"Tabla 1 p.50"
h_conv2[j-1]=Nusselt_cilc2[j-1]*k_c2[j-1]/d_e

"Balances de energía de la partícula en la bandeja 2 periodo secado constante"

Q_c2[j-1]=h_conv2[j-1]*A_contacto*(Ta2[j]-T_bc2[j-1])
Q_c2[j-1]=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta2[j],w=wa2[j])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta_c3[j-1],w=Wa_c3[j-1]))

"Velocidad de secado constante"

r2[j-1]-r_c2[j]=h_conv2[j-1]*A_contacto/(ms*Lv_wc2[j-1])*(Ta2[j]-Tb2[j-1])*t_tc1

"Balances de masa de agua de la partícula en la bandeja 2 periodo secado constante"

ms*(r2[j-1]-r_c2[j])=t_tc1*M_ventilador*(Wa_c3[j-1]-Wa2[j])

"////////////////////SECADO NO CONSTANTE"

"Estos parámetros cambian"
mu_nc2[j-1]=viscosity(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)
rho_nc2[j-1]= Density(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)

"Calculo velocidad del aire seco"

Re_nc2[j-1]=rho_nc2[j-1]*d_e*V_nc2[j-1]/mu_nc2[j-1]
Ar_nc2[j-1]=9.8*d_e^3*rho_nc2[j-1]*(rho_madera-rho_nc2[j-1])/(mu_nc2[j-1]^2)
A_r_nc2[j-1]=((150^(1-epsilon)*Re_nc2[j-1])/(epsilon^3))+((1.75*Re_nc2[j-1]^2)/(epsilon^3))

"Calculamos el coeficiente de convección, que es el principal modo de transferencia"

cp_nc2[j-1]=Cp(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)
Pr_nc2[j-1]=mu_nc2[j-1]*cp_nc2[j-1]/k_nc2[j-1]
k_nc2[j-1]=Conductivity(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)

Nusselt_cilnc2[j-1]=0.3+(0.62*Re_nc2[j-1]^(1/2)*Pr_nc2[j-1]^(1/3))/(1+0.4/(Pr_nc2[j-1]^(2/3)))^(1/4)*(1+(Re_nc2[j-1]/282000)^(5/8))^(4/5)"Tabla 1 p.50"
h_convnc2[j-1]=Nusselt_cilnc2[j-1]*k_nc2[j-1]/d_e

"Temperatura de partícula empieza en bulbo húmedo y luego aumenta"
"Calculo de Q, Tgs, Tpartícula (T1)"

Q_nc2[j-1]=h_convnc2[j-1]*A_contacto*(Ta2[j]-Tb2[j-1])
Q_nc2[j-1]=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta2[j],w=wa2[j])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta_nc3[j-1],w=Wa_nc3[j-1]))
Q_nc2[j-1]*(1-f2[j-1])= ms*cpb*(T_bnc2[j]-Tb2[j-1])*t_tc1

f2[j-1]=(r2[j-1]-X_eg2)/(X_pfs-X_eg2)

"Balance de masa de agua de la partícula para secado no constante"

ms*(r2[j-1]-r_nc2[j])=M_ventilador*t_tc1*(Wa_nc3[j-1]-Wa2[j])

"Calculo de la humedad final del escalón"

Lv_wnc2[j-1]=Enthalpy_vaporization(Steam,T=Tb2[j-1])+1.82*(Ta2[j]-Tb2[j-1]) "J/kg"
r2[j-1]-r_nc2[j]=f2[j-1]*h_convnc2[j-1]*A_contacto/(ms*Lv_wnc2[j-1])*(Ta2[j]-Tb2[j-1])*t_tc1

"Condicionales"

r2[j]=if(r_c2[j],0.23,r_nc2[j],r_c2[j],r_c2[j])
Tb2[j]=if(r_c2[j],0.23,T_bnc2[j-1],T_bc2[1],T_bc2[1])
Ta3[j]=if(r_c2[j],0.23,Ta_nc3[j-1],Ta_c3[1],Ta_c3[1])
Wa3[j]=if(r_c2[j],0.23,Wa_nc3[j-1],Wa_c3[j-1],Wa_c3[j-1])

END
```

Los resultados de cálculo de los condicionales quedan expuestos en la memoria de este trabajo fin de grado.

3.2 CÁLCULO DEL SECADERO COMPLETO

Este apartado del anexo muestra el modelo matemático que actúa sobre la totalidad del secadero. Para ello se han simulado las 12 bandejas. Cabe destacar que, a partir de la segunda bandeja, todas las bandejas se programan de la misma manera, por ello, solo se mostrará el código de las dos primeras.

La dificultad en la elaboración de este programa ha sido el de saber que simplificaciones hacer sobre las variables para conseguir simular las 12 bandejas en un mismo programa. Esto es consecuencia de que el programa EES está limitado a 12000 variables. También se han supuesto los Reynolds de cada bandeja constantes y se ha suprimido alguna variable que estaba repetida.

A continuación, se muestra el código. Se han establecido intervalos de iteración de 200 segundos para disminuir el número de variables.

"CALCULO CINETICA DE LA PARTICULA EN CUALQUIER BANDEJA"

"Condiciones iniciales"

```
Q_ventilador=2300/3600 "m³/s"
rho_0=Density(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)"kg/m³"
M_ventilador=Q_ventilador*rho_0 "kg/s"
w1[1]=0,01 "Hum. especifica aire"

epsilon=(V_T-V_R)/V_T "Porosidad"
V_T=2*2*L
V_R=0,7*V_T
L=0,1 "m"

d_e= 0,03 "m" "diametro equivalente de particula"
A_contacto=2*2*0,7 "m²"

ms=17 "kg biomasa seca, se necesitan 200 kg al dia y hay 12 bandejas "
```

Una vez las condiciones iniciales están definidas, se muestra el código de la primera de las bandejas.

"//////////BANDEJA 1"

"CALENTAMIENTO"

```
rr01[1]=0,3
rr1[1]=rr01[1]

T0=25
Tb01[1]=T0

Duplicate j=2,11 "Hasta temperatura de bulbo húmedo"

Tb01[j]=Tb01[j-1]+1

Q_t01[j-1]=h_conv1*A_contacto*(Tg-Tb01[j-1])
Q_t01[j-1]=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=Pg,T=Tg,w=w1[1])-Enthalpy(AirH2O,P=Pg,T=Ta02[j],w=Wa_c2[1]))

1-r01[j-1]=((Tb01[j-1]-Tb1[1])/(T0-Tb1[1]))

Q_t01[j-1]*(1-r01[j-1])=ms*cpb*(Tb01[j]-Tb01[j-1])/t_01[j-1]

rr01[j-1]-rr01[j]=r01[j-1]*h_conv1*A_contacto/(ms*(Enthalpy_vaporization(Steam,T=T_bc1[1]+1,82*(Tg-T_bc1[1]))*(Tg-Tb01[j-1])*t_01[j-1])

END

"Condiciones iniciales"
Tg=100 "°C"
Pg=101325 "Pa"

T_bc1[1]=WetBulb(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg) "Es la temperatura de bulbo húmedo que irá aumentando"
rho_madera=500 "kg/m³"

"Estos parámetros no cambian"
mu_c1=viscosity(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)

"Simplificación de Reynolds"

Re_c1=2000
```



"Calculamos el coeficiente de convección, que es el principal modo de transferencia"

```
cp_c1=Cp(AirH2O;T=Tg;w=w1[1];P=Pg)
Pr_c1=mu_c1*cp_c1/k_c1
k_c1=Conductivity(AirH2O;T=Tg;w=w1[1];P=Pg)
```

```
Nusselt_cilc1=0,3+(0,62*Re_c1^(1/2)*Pr_c1^(1/3))/(1+0,4/(Pr_c1)^(2/3))^(1/4)*(1+(Re_c1/282000)^(5/8))^(4/5)"Tabla 1 p.50"
h_conv1=Nusselt_cilc1*k_c1/d_e
```

"Balances de energía de la partícula en la bandeja 1 periodo secado constante"

```
M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O;P=pg;T=Tg;w=w1[1])-Enthalpy(AirH2O;P=pg;T=Ta_c2[1];w=Wa_c2[1]))=h_conv1*A_contacto*(Tg-T_bc1[1])
```

"Humedad de equilibrio y saturación de fibras"

```
X_eg=0,03677"kg agua/kg seco"
X_pfs=0,2377
cpb=2893,4 "J/kgK, si bajamos sale negativo"
T_bnc1[1]=WetBulb(AirH2O;T=Tg;w=w1[1];P=Pg)
```

```
rr1[1]=r_c1[1]
Tb1[1]=T_bc1[1]
t_tc1=200
```

"////////////////////SECADO CONSTANTE"

Duplicate j=2:50

"Secado de la partícula"

```
rr1[j-1]-r_c1[j]=h_conv1*A_contacto/(ms*(Enthalpy_vaporization(Steam;T=T_bc1[1])+1,82*(Tg-T_bc1[1]))*(Tg-Tb1[j-1])*t_tc1
```

"Balances de masa de la partícula en la bandeja 1 periodo secado constante"

```
ms*(rr1[j-1]-r_c1[j])=t_tc1*M_ventilador*(Wa_c2[j-1]-W1[1])
```

"////////////////////SECADO NO CONSTANTE"

"Temperatura de partícula empieza en bulbo húmedo y luego aumenta"
"Calculo de Q, Tgs, Tpartícula (T1)"

```
h_conv1*A_contacto*(Tg-Tb1[j-1])=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O;P=pg;T=Tg;w=w1[1])-Enthalpy(AirH2O;P=pg;T=Ta_nc2[j-1];w=Wa_nc2[j-1]))
h_conv1*A_contacto*(Tg-Tb1[j-1])*(1-f[j-1])= ms*cpb*(T_bnc1[j]-Tb1[j-1])/t_tc1
```

```
f[j-1]=((rr1[j-1]-X_eg)/(X_pfs-X_eg))^(1/2)
```

"Balance de masa de agua para calcular w2"

```
ms*(rr1[j-1]-r_nc1[j])=M_ventilador*t_tc1*(Wa_nc2[j-1]-W1[1])
```

"Calculo de la humedad final del escalón"

"Quito ecuaciones para ganar nuevas iteraciones Lv_wnc y Lv_wc"

```
rr1[j-1]-r_nc1[j]=f[j-1]*h_conv1*A_contacto/(ms*(Enthalpy_vaporization(Steam;T=Tb1[j-1])+1,82*(Tg-Tb1[j-1]))*(Tg-Tb1[j-1])*t_tc1
```

"Condicionales"

```
rr1[j]=if(r_c1[j-1];X_pfs;r_nc1[j];r_c1[j];r_c1[j])
Tb1[j]=if(r_c1[j-1];X_pfs;T_bnc1[j-1];T_bc1[1];T_bc1[1])
Ta2[j]=if(r_c1[j-1];X_pfs;Ta_nc2[j-1];Ta_c2[1];Ta_c2[1])
Wa2[j]=if(r_c1[j-1];X_pfs;Wa_nc2[j-1];Wa_c2[j-1];Wa_c2[j-1])
```

END

Una vez hecha la bandeja 1, se muestra el código de la 2, que será un código que se repetirá hasta la bandeja 12, únicamente cambiando el proceso de calentamiento y los subíndices de las variables.



```
"/"//////////BANDEJA 2"

"/"//////////CALENTAMIENTO"

Tb02[1]=T0
rr02[1]=0,3
rr2[1]=rr02[10]
Tb2[1]=T_bc2[1]

"Calentamiento de la partícula"

Duplicate j=2;10

Tb02[j]=Tb02[j-1]+1

Q_t02[j-1]=h_conv2[j-1]*A_contacto*(Ta2[2]-Tb02[j-1])
Q_r02[j-1]=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta2[j],w=wa2[j])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta03[j],w=Wa_c3[1]))
1-f02[j-1]=((Tb02[j-1]-Tb2[1])/(T0-Tb2[1]))
Q_t02[j-1]*(1-f02[j-1])=ms*cpb*(Tb02[j]-Tb02[j-1])/t_02[j-1]
rr02[j-1]-rr02[j]=f02[j-1]*h_conv2[j-1]*A_contacto/((ms*(Enthalpy_vaporization(Steam,T=T_bc2[j-1])+1,82*(Ta2[j]-T_bc2[j-1]))*(Ta2[2]-Tb02[j-1])*t_02[j-1]
END

"/"//////////SECADO CONSTANTE"

T_bnc2[1]=WetBulb(AirH2O,T=Ta2[2],w=Wa2[2],P=Pg)
Re_c2=2040

Duplicate j=2;50

T_bc2[j-1]=WetBulb(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg) "Es la temperatura de bulbo húmedo que irá aumentando ya que la temperatura de gas aumenta"
mu_c2[j-1]=viscosity(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)

"Calculamos el coeficiente de convección, que es el principal modo de transferencia"

cp_c2[j-1]=Cp(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)
Pr_c2[j-1]=mu_c2[j-1]*cp_c2[j-1]/k_c2[j-1]
k_c2[j-1]=Conductivity(AirH2O,T=Ta2[j],w=wa2[j],P=Pg)

Nusselt_cilc2[j-1]=0,3+(0,62*Re_c2^(1/2)*Pr_c2[j-1]^(1/3))/(1+0,4/(Pr_c2[j-1])^(2/3))^(1/4)*(1+(Re_c2/282000)^(5/8))^(4/5)"Tabla 1 p.50"
h_conv2[j-1]=Nusselt_cilc2[j-1]*k_c2[j-1]/d_e

"Balances de energía de la partícula en la bandeja 2 periodo secado constante"

h_conv2[j-1]*A_contacto*(Ta2[j]-T_bc2[j-1])=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta2[j],w=wa2[j])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta_c3[j-1],w=Wa_c3[j-1]))
rr2[j-1]-r_c2[j]=h_conv2[j-1]*A_contacto/(ms*(Enthalpy_vaporization(Steam,T=T_bc2[j-1])+1,82*(Ta2[j]-T_bc2[j-1]))*(Ta2[j]-Tb2[j-1])*t_tc1

"Balances de masa de agua de la partícula en la bandeja 2 periodo secado constante"

ms*(rr2[j-1]-r_c2[j])=t_tc1*M_ventilador*(Wa_c3[j-1]-Wa2[j])

"/"//////////SECADO NO CONSTANTE"

"Temperatura de partícula empieza en bulbo húmedo y luego aumenta"
"Calculo de Q, Tgs, Tpartícula (T1)"

h_conv2[j-1]*A_contacto*(Ta2[j]-Tb2[j-1])=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta2[j],w=wa2[j])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta_nc3[j-1],w=Wa_nc3[j-1]))
h_conv2[j-1]*A_contacto*(Ta2[j]-Tb2[j-1])*(1-f2[j-1])=ms*cpb*(T_bnc2[j]-Tb2[j-1])/t_tc1
f2[j-1]=((rr2[j-1]-X_eg)/(X_pfs-X_eg))^(1/2)

"Balance de masa de agua de la partícula para secado no constante"

ms*(rr2[j-1]-r_nc2[j])=M_ventilador*t_tc1*(Wa_nc3[j-1]-Wa2[j])

"Calculo de la humedad final del escalón"

rr2[j-1]-r_nc2[j]=f2[j-1]*h_conv2[j-1]*A_contacto/(ms*(Enthalpy_vaporization(Steam,T=Tb2[j-1])+1,82*(Ta2[j]-Tb2[j-1]))*(Ta2[j]-Tb2[j-1])*t_tc1

"Condicionales"

rr2[j]=if(r_c2[j];X_pfs;r_nc2[j];r_c2[j])
Tb2[j]=if(r_c2[j];X_pfs;T_bnc2[j-1];T_bc2[1];T_bc2[1])
Ta3[j]=if(r_c2[j];X_pfs;Ta_nc3[j-1];Ta_c3[1];Ta_c3[1])
Wa3[j]=if(r_c2[j];X_pfs;Wa_nc3[j-1];Wa_c3[j-1];Wa_c3[j-1])

END
```

Los resultados de cálculo de los condicionales quedan expuestos en la memoria de este trabajo fin de grado.

3.3. CÁLCULO DE MEDIAS Y VARIACIÓN DE PARÁMETROS

En este apartado del anexo se muestra el código y el procedimiento a partir del cual se han desarrollado los promedios de humedad relativa de biomasa y cómo se han variado los parámetros para ver las tendencias del secado.

En primer lugar, para el cálculo de la humedad media, se ha tomado el calentamiento de la bandeja 6. Como es una bandeja intermedia es el promedio estará ahí. Esto se ha hecho así debido a la dificultad para sacar medias de tiempo durante el calentamiento.

%%CALENTAMIENTO"

```
Tb06[1]=T0
rr06[1]=0,3
rr6[1]=rr06[6]
Tb6[1]=T_bc6[1]

Duplicate j=2;6

Tb06[j]=Tb06[j-1]+1

Q_t06[j-1]=h_conv6[j-1]*A_contacto*(Ta6[2]-Tb06[j-1])
Q_t06[j-1]=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta6[j],w=wa6[j])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta07[j],w=Wa_c7[1]))

1-f06[j-1]=((Tb06[j-1]-Tb6[1])/(T0-Tb6[1]))

Q_t06[j-1]*(1-f06[j-1])=ms*cpb*(Tb06[j]-Tb06[j-1])/t_06[j-1]

rr06[j-1]-rr06[j]=f06[j-1]*h_conv6[j-1]*A_contacto/(ms*(Enthalpy_vaporization(Steam,T=T_bc6[j-1])+1,82*(Ta6[j]-T_bc6[j-1]))*(Ta6[2]-Tb06[j-1])/t_06[j-1])

END
```

Para el proceso de secado constante y no constante se ha realizado un promedio a partir de todas las bandejas, ya que los intervalos de tiempo son iguales.

"HUMEDAD DE PARTÍCULA MEDIA EN EL SECADERO"

```
duplicate j=2;50

rr_media[j-1]=(rr1[j-1]+rr2[j-1]+rr3[j-1]+rr4[j-1]+rr5[j-1]+rr6[j-1]+rr7[j-1]+rr8[j-1]+rr9[j-1]+rr10[j-1]+rr11[j-1]+rr12[j-1])/12

END
```

Por otro lado, para variar los parámetros y observar su influencia, los parámetros de humedad inicial de partícula, caudal de gases y cantidad de biomasa por bandeja solo se han tenido que actualizar los valores de manera directa, sin mayor influencia sobre el programa.

"Condiciones iniciales"

```
Q_ventilador=2300/3600 "m^3/s"
rho_0=Density(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)"kg/m^3"
M_ventilador=Q_ventilador*rho_0 "kg/s"
w1[1]=0,01 "Hum. especifica aire"

epsilon=(V_T-V_R)/V_T "Porosidad"
V_T=2*2*L
V_R=0,7*V_T
L=0,1"m"

d_e= 0,03 "m" "diametro equivalente de partícula"
A_contacto=2*2*0,7 "m^2"

ms=17"kg biomasa seca, se necesitan 200 kg al día y hay 12 bandejas "
```

%%BANDEJA 1"

"CALENTAMIENTO"

```
rr01[1]=0,3
rr1[1]=rr01[11]
```



Para cambiar la temperatura de gases por debajo de 100°C no hay variación en el programa ya que solo hay que cambiar la temperatura de gases, la humedad de equilibrio y la humedad de saturación de fibras.

"Condiciones iniciales"

Tg=100°C
Pg=101325 "Pa"

T_bc1[1]=WetBulb(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg) "Es la temperatura de bulbo húmedo que irá aumentando"
rho_madera=500 "kg/m³"

"Estos parámetros no cambian"

mu_c1=viscosity(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)

"Simplificación de Reynolds"

Re_c1=2000

"Calculamos el coeficiente de convección, que es el principal modo de transferencia"

cp_c1=Cp(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)
Pr_c1=mu_c1*cp_c1/k_c1
k_c1=Conductivity(AirH2O,T=Tg,w=w1[1],P=Pg)

Nusselt_cilc1=0.3+(0.62*Re_c1^(1/2)*Pr_c1^(1/3))/(1+0.4/(Pr_c1)^(2/3))^(1/4)*(1+(Re_c1/282000)^(5/8))^(4/5)"Tabla 1 p.50"
h_conv1=Nusselt_cilc1*k_c1/d_e

"Balances de energía de la partícula en la bandeja 1 periodo secado constante"

M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Tg,w=w1[1])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta_c2[1],w=Wa_c2[1]))=h_conv1*A_contacto*(Tg-T_bc1[1])

"Humedad de equilibrio y saturación de fibras"

X_eg=0.03677 "kg agua/kg seco"
X_pfs=0.2377

Para cambiar la temperatura por encima de los 100°C el código varía. Ahora el calentamiento es el periodo de secado predominante y el que bajará la humedad hasta el 10%. Ahora no está definida la temperatura de bulbo húmedo. Para resolver este apartado se han elaborado iteraciones sobre la temperatura de la biomasa de 1°C, hasta llegar a 100°C, y una vez ahí se ha observado la humedad final.

A partir de la segunda bandeja, todas las demás bandejas se han resuelto de la misma manera, por ello solo se mostrarán las dos primeras.

Para la bandeja 1, el proceso de calentamiento es el siguiente.

////////////////////////////////////CALENTAMIENTO DE LA PARTÍCULA"

Duplicate j=2;73

Tb01[j]=Tb01[j-1]+1

Q_t01[j-1]=h_conv1*A_contacto*(Tg-Tb01[j-1])
Q_t01[j]=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Tg,w=w1[1])-Enthalpy(AirH2O,P=pg,T=Ta02[j],w=Wa_c2[1]))

1-f01[j-1]=((Tb01[j-1]-Tb1[1])/(T0-Tb1[1]))

Q_t01[j-1]*(1-f01[j-1])=ms*cpb*(Tb01[j]-Tb01[j-1])/t_01[j-1]

rr01[j-1]-rr01[j]=f01[j-1]*h_conv1*A_contacto/(ms*Lv_wc1)*(Tg-Tb01[j-1])*t_01[j-1]

END

Para la bandeja 2, el proceso de calentamiento es distinto, ya que las variables vienen precedidas de la bandeja 1.



```

"////////////////////CALENTAMIENTO"
Duplicate j=2;73
Tb02[j]=Tb02[j-1]+1

Q_t02[j-1]=h_conv2[j-1]*A_contacto*(Ta02[j]-Tb02[j-1])
Q_t02[j-1]=M_ventilador*(Enthalpy(AirH2O;P=pg;T=Ta02[j];w=wa2[2])-Enthalpy(AirH2O;P=pg;T=Ta03[j];w=wa_c3[1]))

1-f02[j-1]=((Tb02[j-1]-Tb2[j-1])/(T0-Tb2[j-1]))

Q_t02[j-1]*(1-f02[j-1])=ms*cpb*(Tb02[j]-Tb02[j-1])/t_02[j-1]

rr02[j-1]-rr02[j]=f02[j-1]*h_conv2[j-1]*A_contacto/(ms*Lv_wc2[j-1])*(Ta2[2]-Tb02[j-1])*t_02[j-1]

Lv_wc2[j-1]=Enthalpy_vaporization(Steam;T=Tb02[j-1])+1,82*(Ta02[j]-Tb02[j-1]) "J/kg"

Tb2[j]=if(Ta02[j];100;WetBulb(AirH2O;T=Tx2;w=wa2[2];P=Pg);100;100)

"Estos parámetros cambian"
mu_c2[j-1]=viscosity(AirH2O;T=Ta02[j];w=wa2[2];P=Pg)
rho_c2[j-1]=Density(AirH2O;T=Ta02[j];w=wa2[2];P=Pg)

"Calculo velocidad del aire seco"

"Calculamos el coeficiente de convección, que es el principal modo de transferencia"

Pr_c2[j-1]=mu_c2[j-1]*cp/k_c2[j-1]
k_c2[j-1]=Conductivity(AirH2O;T=Ta02[j];w=wa2[2];P=Pg)

Nusselt_cilc2[j-1]=0,3+(0,62*Re_c2^(1/2)*Pr_c2[j-1]^(1/3))/(1+0,4/(Pr_c2[j-1])^(2/3))^(1/4)*(1+(Re_c2/282000)^(5/8))^(4/5)"Tabla 1 p.50"
h_conv2[j-1]=Nusselt_cilc2[j-1]*k_c2[j-1]/d_e

END

```

Una vez el código queda completamente desarrollado, a partir de Excel se han tomado unos puntos de medición que mostrarán los resultados finales.

MEDIA HUMEDAD	MEDIA TIEMPO	150
0,10	74,60	
0,15	58,10	
0,20	41,87	
0,25	25,24	
0,30	0,00	
MEDIA HUMEDAD	MEDIA TIEMPO	200
0,098	69,35	
0,150	54,98	
0,199	40,83	
0,250	25,31	
0,3	0	
MEDIA HUMEDAD	MEDIA TIEMPO	125
0,101	93,08	
0,151	69,20	
0,201	47,43	
0,250	27,26	
0,3	0	

Los resultados de cálculo finales se muestran en la memoria de este trabajo fin de grado.