

### ANÁLISE PRELIMINAR DA SECAGEM DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA A PRODUÇÃO DE BIOENERGIA

Fernando Pereira Garcia<sup>1</sup> (IC), Hugo Perazzini (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Biomassa. Casca de café. Secador.

#### Introdução

A discussão sobre formas alternativas de energia é de extrema importância para o cenário energético atual, no qual a demanda deste recurso esgotável é cada vez maior. Para a produção de bioenergia por meio da biomassa de resíduos agroindustriais, as etapas de pré-tratamento são fundamentais, pois garantem a qualidade da biomassa para os processos seguintes de conversão termoquímica. O objetivo desta pesquisa foi propor um modelo matemático para o projeto de um secador do tipo esteira para ser utilizado no pré-tratamento de biomassa de resíduos agroindustriais e, além disso, realizar a estimativa dos custos do processo para estudos de viabilidade econômica. O modelo proposto consistiu em um conjunto de equações que descrevem os requisitos de energia térmica e elétrica da secagem, o dimensionamento do equipamento e os custos do processo. A determinação experimental da cinética de secagem em escala laboratorial foi necessária para a estimativa do tempo de residência do material no secador.

#### Metodologia

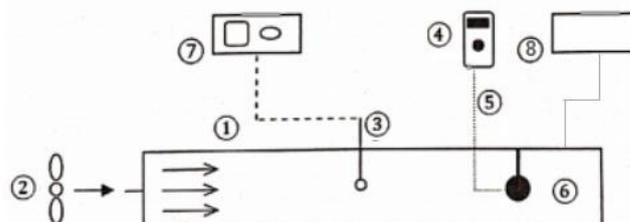
Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada como biomassa cascas de café da espécie *coffea arabica*, recolhidas no município de Cristina, Minas Gerais. O café foi colhido por derriça (derrubada de todos os grãos do cafeeiro de uma única vez) e as cascas foram geradas pelo processo via úmida. Logo após, foram armazenadas em sacos de estopa.

As cascas congeladas a temperatura de -6 °C e, após removidas do congelador, foram mantidas em refrigeração por um período de 12h para descongelamento. Em seguida, as cascas foram dispostas uniformemente em peneiras suspensas por aproximadamente 2 horas à temperatura ambiente para a remoção da umidade superficial e entrada do equilíbrio térmico. Após esse período, o material foi colocado em uma célula de secagem e em seguida, feita sua pesagem em uma balança analítica para a determinação da massa inicial de material úmido.

Para a realização do processo de secagem foram confeccionadas a partir de uma tela de aço galvanizado cinco células de secagem de dimensões fixas 10x10 cm (largura e comprimento), com diferentes espessuras: 0,32, 0,50, 1,00, 1,50 e 1,68 cm.

Os experimentos foram realizados em um secador convectivo, tipo túnel (Figura 1) com medidas de massa automatizada em intervalos de um minuto, até atingir o equilíbrio dinâmico com as condições do ar de secagem. Este equipamento é constituído por um túnel de vento (1), soprador (2), sensor tipo Pt100 (3), indicador digital de temperatura (4), termopar (5), célula de secagem (6), painel de controle (7) e balança digital (8).

Figura 1 – Secador túnel de vento



Após o término da secagem, quando a massa da amostra deixou de variar, o material foi transferido para uma placa de Petri e mantido por 24 horas na estufa à temperatura de 105 °C, necessário para a determinação da massa de sólidos seco, e conseqüentemente, obter a umidade para cada tempo de secagem. Finalizado esse procedimento, a placa de Petri contendo o material seco foi pesada.

Para a estimativa da capacidade de processamento tem-se, primeiramente, as Eq. (1) e (2) que determinam a capacidade de processamento da matéria-prima  $m_t$  [ton/ano] e a quantidade de resíduos gerada no Brasil  $m_r$  [ton/ano].

$$m_t = A_p P \quad (1)$$

$$m_r = m_t p \quad (2)$$

Onde,  $A_p$  [ha/ano] é área agrícola de produção/cultivo no ano analisado,  $P$  [ton/ha] a produção média do produto agrícola de interesse e  $p$  a porcentagem de resíduo da produção agrícola ou do processo. Os dados para as variáveis  $A_p$  e  $P$  foram obtidas consultando as tabelas

sobre o levantamento sistemático da produção agrícola brasileira (IBGE, 2020).

A vazão de alimentação  $F_u$  [ton/h], que representa a quantidade de biomassa úmida a ser processada no secador é definida pela Eq. (3). Sendo,  $t_{op}$  [h/ano] o tempo de operação anual de uma planta de secagem.

$$F_u = m_r t_{op} \quad (3)$$

Nos cálculos do projeto do secador são utilizados os balanços de massa e energia, entretanto, se utiliza apenas o valor da vazão de sólidos secos  $F_s$  [ton/h] definida pela Eq. (4), sendo,  $X_{bu}^1$  a umidade do sólido em base úmida na entrada do secador.

$$F_s = F_u - (F_u \times X_{bu}^1) \quad (4)$$

Para realizar os cálculos energéticos, primeiramente é preciso determinar a potência teórica dissipada  $Pot_d$  [MJ/ano] pela Eq. (5). Em que,  $PCI$  [MJ/kg] é o potencial calorífico inferior da biomassa e  $k$  [s/ano] uma constante de ajuste de tempo de ano para segundos.

$$Pot_d = (m_r)(PCI)(k) \quad (5)$$

Após o cálculo de  $Pot_d$ , pode-se determinar a potência elétrica gerada ( $Pot_{el}$ ) e a energia gerada pela planta ( $E_{el}$ ) por meio da Eq. (6) e da Eq. (7).

$$Pot_{el} = Pot_d \eta \quad (6)$$

$$E_{el} = Pot_{el} t_{op} FC \quad (7)$$

$Pot_{el}$  é calculado em MW e  $E_{el}$  em MWh/ano,  $\eta$  é o coeficiente de eficiência do ciclo Rankine e  $FC$  é o fator de capacidade.

A Eq. (8) que determina a pressão de vapor na temperatura de secagem, em que  $P_s$  é calculado em bar, a temperatura do ar de secagem  $T$  em °C e as constantes de Antoine para pressão de vapor de água  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  adimensionais. A Eq. (9) definida como equação psicrométrica, calcula a umidade do ar de secagem  $Y$  [kg/kg bs] a partir da razão peso molecular ar-água expressa por  $m$ , pela atividade de água em condições de secagem  $a_w$  e pela pressão  $P$  fornecida em bar.

$$P_s = \exp [a_1 - a_2 / (a_3 + T)] \quad (8)$$

$$Y = m a_w P_s / (P - a_w P_s) \quad (9)$$

Para a cinética de secagem, têm-se as Equações (10), (11) e (12).  $X_e$  [kg/kg bs] é a umidade de equilíbrio em condições de secagem,  $t_c$  e  $t$  [h] são, respectivamente, a constante do tempo de secagem e o tempo de secagem. Foi realizado em laboratório o experimento de determinação do tempo de secagem  $t$  (h), que será apresentado na próxima seção.

$$X_e = b_1 \exp \left[ \frac{b_2}{273 + T} \right] \left[ \frac{a_w}{1 - a_w} \right]^{b_3} \quad (10)$$

$$t_c = c_0 d^{c_1} V^{c_2} T^{c_3} Y^{c_4} \quad (11)$$

$$t = -t_c \ln \left[ \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \right] \quad (12)$$

$b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  representam as constantes da equação de Oswin para materiais isotérmicos,  $d$  [m] é o diâmetro da partícula,  $V$  [m/s] a velocidade do ar de secagem,  $X_0$  e  $X$  [kg/h bs] são teores de umidade inicial e final do material. As Eq. (13) e (14) representadas por  $W$  [ton/h], constituem o balanço de umidade no secador. Sendo a primeira referente ao sólido e a segunda ao ar, respectivamente.  $F_s$  [ton/h] e  $F_a$  [ton/h] são as taxas de fluxos do material e do ar fresco,  $Y$  e  $Y_0$  [kg/h bs] são as umidades do ar de secagem e do ambiente, respectivamente.

$$W = F_s (X_0 - X) \quad (13)$$

$$W = F_a (Y - Y_0) \quad (14)$$

Os requisitos de energia térmica para secagem estão dispostos nas próximas equações. A Eq. (15) refere-se à evaporação da água, a Eq. (16) ao aquecimento de sólidos, a Eq. (17) ao aquecimento de ar rejeitado e a Eq. (18) refere-se à energia total exigida pelo aquecedor.

$$Q_{sh} = F_s [C_{PS} + X_0 C_{PL}] (T - T_0) \quad (15)$$

$$Q_{we} = F_s (X_0 - X) [\Delta H_0 - (C_{PL} - C_{PV}) T] \quad (16)$$

$$Q_{ah} = F_a [C_{PA} + Y_0 C_{PV}] (T - T_0) \quad (17)$$

$$Q = Q_{we} + Q_{sh} + Q_{ah} \quad (18)$$

Onde,  $Q_{we}$ ,  $Q_{sh}$ ,  $Q_{ah}$  e  $Q$  [MW] são as cargas térmicas de vaporização da água, de aquecimento do sólido, de aquecimento de ar e total.  $\Delta H_0$  [kJ/kg] corresponde a condensação de vapor a 0 °C,  $C_{PL}$ ,  $C_{PV}$ ,  $C_{PS}$  e  $C_{PA}$  [kJ/kg k] são os calores específicos da água, do vapor de água, do material seco e do ar.

Para o dimensionamento do aquecedor foi aplicada a Eq. (19). Onde,  $Q$  é calculado em kW,  $A_s$  [m<sup>2</sup>] é a área de transferência do aquecedor de ar e  $U_s$  [kW/m<sup>2</sup> K] o coeficiente de transferência de calor.

$$Q = A_s U_s (T_s - T) \quad (19)$$

Para o dimensionamento do secador, considerando um secador do tipo esteira, tem-se a Eq. (20) que correlaciona o tempo de residência com a retenção de massa e a Eq. (21) a retenção de massa com a retenção de volume. Estas equações são válidas para todos os tipos de secadores. A Eq. (22) é a distribuição geométrica da retenção de volume na esteira. A Eq. (23) calcula a área de esteira necessária e a Eq. (24) a velocidade de esteira necessária para obter o tempo de residência desejado.

$$M = tF_s(1 + X_0) \quad (20)$$

$$M = (1 - \varepsilon)\rho_s H \quad (21)$$

$$H = Z_0 DL \quad (22)$$

$$A_b = LD \quad (23)$$

$$u_b = L/t \quad (24)$$

Em que  $M$  são determinados em toneladas [ton],  $H$  em  $m^3$ ,  $A_b$  em  $m^2$  e  $u_b$  em  $m/s$ .  $\mathcal{E}$  [kJ/kg] é a fração vazia de carregamento,  $\rho_s$  [ton/ $m^3$ ] é a densidade do material seco,  $Z_0$ ,  $D$  e  $L$ [m] são a espessura de carregamento, largura e comprimento do secador.

O dimensionamento do soprador é determinado pelas equações: Eq. (25) para o  $\Delta P$  [bar] que calcula a perda de pressão do ar através da esteira carregada, a Eq. (26) para  $F_i$  [kg/s] que correlaciona o fluxo de ar com a velocidade do ar e por último, a Eq. (27) para  $E_f$  [kW] que estima a potência elétrica necessária para operar o soprador.

$$\Delta P = f_1 Z_0 V^2 \quad (25)$$

$$F_i = \rho_a VDL \quad (26)$$

$$E_f = \Delta P F_i / \rho_a \quad (27)$$

Em que  $V$  [m/s] é a velocidade do ar de secagem e  $f_1$  é definido como a potência da equação de perda de pressão e  $\rho_a$  [kg/ $m^3$ ] a densidade do ar.

A Eq. (28) para  $E_b$  estima a potência elétrica em kW necessária para mover a esteira. Sendo  $e_1$  a constante da equação de potência do acionador da esteira.

$$E_b = e_1 L(1 + X_0) F_s \quad (28)$$

A potência elétrica total necessária é calculada através da Eq. (29), onde  $E$  é expresso em kW.

$$E = E_b + E_f \quad (29)$$

As Eq. (30) e (31) definem o desempenho térmico do secador e a capacidade de evaporação por unidade de área da esteira, respectivamente.

$$n = Q_{we}/Q \quad (30)$$

$$r = W/A_b \quad (31)$$

Em que  $n$  é a eficiência térmica e  $r$  [kg/h  $m^2$ ] é a taxa específica de evaporação.

Para a análise de viabilidade, a Eq (32) para  $C_{eq}$  calcula o custo do equipamento em k\$. Sendo,  $C_{bel}$ ,  $C_{exc}$  [\$/ $m^2$ ] e  $C_{fan}$  [\$/kW] os custos unitários do secador esteira, do trocador de calor e do soprador, respectivamente,  $n_{bel}$ ,  $n_{exc}$  e  $n_{fan}$  o fator de dimensionamento do tamanho do equipamento para o secador esteira, trocador de calor e soprador.

$$C_{eq} = C_{bel} A_b^{n_{bel}} + C_{exc} A_s^{n_{exc}} + C_{fan} E_f^{n_{fan}} \quad (32)$$

O custo de operação anual  $C_{op}$  [k\$/ano] é determinado pela Eq. (33), sendo  $C_s$  e  $C_e$  [\$/kW h] os custos do vapor de aquecimento e da eletricidade, respectivamente.

$$C_{op} = (C_s Q + C_e E) t_{op} \quad (33)$$

O custo operacional total em k\$/ano é definido pela Eq. (34), sendo,  $e$  o fator de recuperação de capital calculado a partir da Eq. (35); em que  $i_r$  é a taxa de juros e  $l_f$  [ano] é o tempo de vida.

$$TAC = e C_{eq} + C_{op} \quad (34)$$

$$e = \frac{i_r(1 + i_r)^{l_f}}{(1 + i_r)^{l_f} - 1} \quad (35)$$

## Resultados e discussão

As curvas de secagem foram representadas na forma de adimensional de umidade em função do tempo de secagem, conforme mostram as Figuras 2 e 3. Nota-se uma secagem mais rápida para a temperatura de 110 °C e também para a velocidade de 2,00 m/s. Contudo, ao analisar Figura 4, observa-se que para ambas espessuras não houve uma diferença significativa entre as curvas. Isso mostra que a condição de camada delgada pode ser conseguida para espessuras de até 1 cm.

Figura 2 – Gráfico com influência da temperatura do ar de secagem

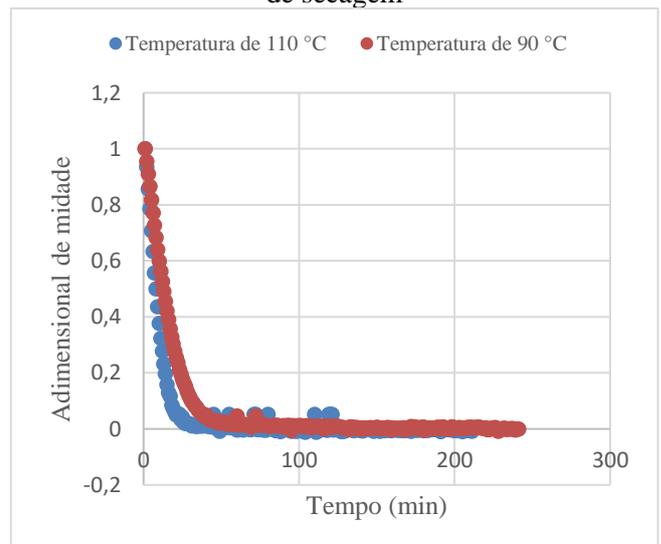


Figura 3 – Gráfico com influência da velocidade do ar de secagem

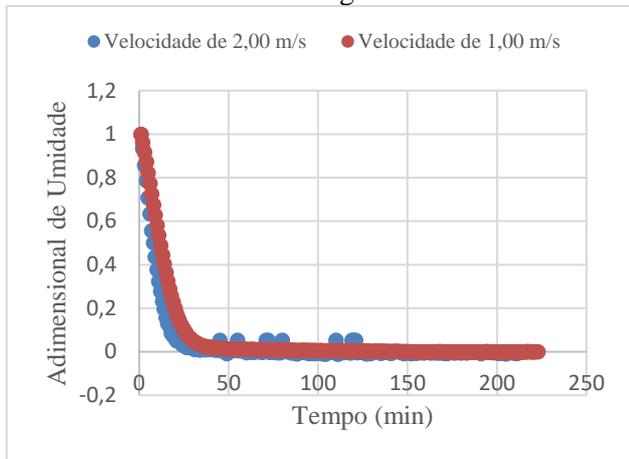
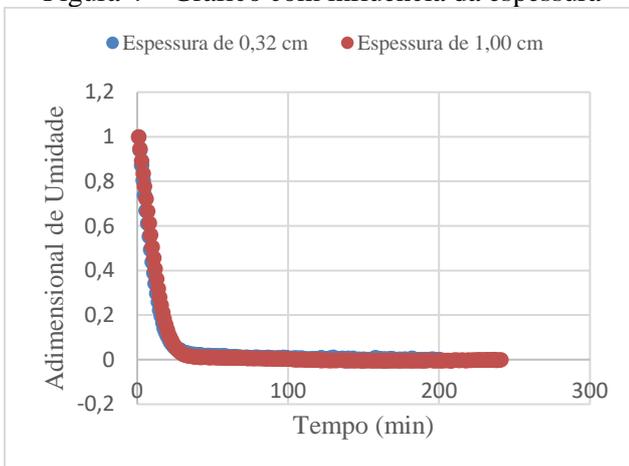


Figura 4 – Gráfico com influência da espessura



A Tabela 1 apresenta os valores referentes ao tempo de secagem para cada condição operacional analisada.

Tabela 1 – Tempo de secagem

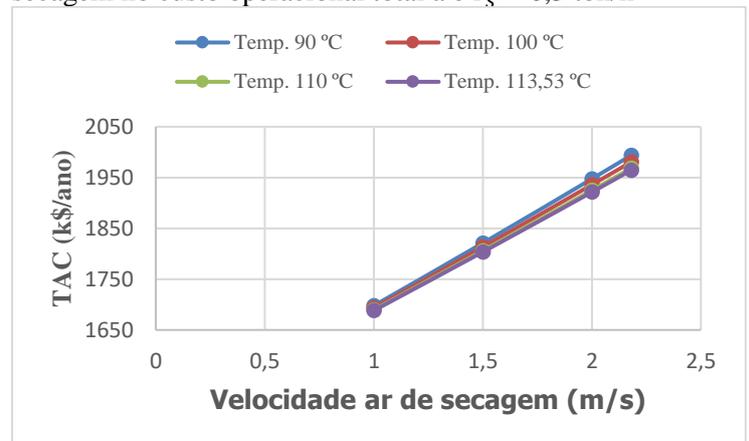
Ensaio	Variáveis			
	T (°C)	V (m/s)	Z <sub>0</sub> (cm)	t (h)
1	90,00	2,00	0,50	3,97
2	110,00	2,00	0,50	3,50
3	110,00	1,00	0,50	3,70
4	100,00	1,50	0,32	3,33
5	100,00	1,50	1,00	3,95
6	90,00	1,00	1,50	3,68
7	100,00	1,50	1,00	3,40
8	113,53	1,50	1,00	3,93
9	110,00	2,00	1,50	3,97
10	100,00	2,18	1,00	4,00
11	100,00	1,50	1,00	3,90

Assim, a partir dos dados presentes na Tabela 1 e da metodologia composta pelo conjunto de equações, determinou-se para uma faixa  $F_s$  compreendida entre 0,3 a 0,7 ton/h, o valor de energia térmica total requerida para a secagem foi de 1,91 MW. Para  $E_b$  e  $E$ , que representam a potência elétrica necessária para mover a esteira e a

potência elétrica total, encontrou-se 36,13 e 771,46 kW, respectivamente. Por fim, os custos do processo resultantes do dimensionamento do secador,  $C_{eq}$ ,  $C_{op}$  e TAC foram 348,52 k\$, 1775,50 k\$, e 1884,14 k\$/ano, respectivamente.

Com base nos valores encontrados, a Figura 5 relaciona os custos totais do processo com a velocidade do ar, que juntamente com a temperatura do ar, são as principais variáveis do processo de secagem, que mostra uma influência significativa da velocidade do ar no custo total do processo.

Figura 5 – Efeito da velocidade e da temperatura do ar de secagem no custo operacional total a  $F_s = 0,3$  ton/h



### Conclusões

Neste trabalho, um modelo matemático preliminar foi proposto para analisar os custos de uma operação de secagem de biomassa. Verificou-se que a velocidade do ar e a temperatura do ar afetam significativamente o custo total do processo de secagem. Isso mostra que tais variáveis precisam ser balanceadas para garantir a viabilidade econômica do processo e também o pré-tratamento viável da biomassa.

### Agradecimento

Agradeço, à Universidade Federal de Itajubá e a Fapemig pelo apoio na realização desta pesquisa. Ao meu orientador Prof. Hugo Perazzini, pela oportunidade e pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

### Referências

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Quantidade Produzida*: toneladas. Toneladas. 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7832#resultado>. Acesso em: 23 dez. 2021.

MAROULIS, Z. B. SARAVACOS, G.D., MUJUMDAR, A. S., 2015. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group. 1312 p.