



ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA NA SECAGEM DE FERTILIZANTE

WILLIAM J. MORAIS¹; EDU B. ARRUDA¹; NÁDIA G. SOUSA¹; SANDRA C. DANTAS^{1*}

¹Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Química

*e-mail: sandra.dantas@uftm.edu.br

RESUMO - A evolução da tecnologia e do crescimento populacional faz surgir a necessidade de maior eficiência às práticas de cultivos alimentares e de produtos de alta qualidade e durabilidade. Dessa forma, o uso de fertilizantes se torna um insumo essencial. Assim como outros produtos industrializados, os fertilizantes necessitam ser submetidos ao processo de secagem para a remoção do excesso de umidade, etapa fundamental para a qualidade final do produto. Secadores rotativos são empregados em diversos processos industriais e nas agroindústrias são utilizados na secagem de fertilizantes. A modelagem e simulação de secadores rotativos é um grande desafio, envolvendo transferência simultânea de massa e calor e complexos processos fluidodinâmicos. O objetivo do trabalho foi realizar uma análise de sensibilidade paramétrica das variáveis de projeto de secador rotativo operando com fluxo contracorrente, como diâmetro e comprimento do secador e as variáveis operacionais tais como a temperatura de entrada do ar de secagem, velocidade do ar e umidade inicial do fertilizante, além de analisar os efeitos causados desses parâmetros nas umidades e temperaturas. Os resultados obtidos demonstram a importância da análise de parâmetros e visam descobrir quais são os mais significativos para o modelo, contribuindo para um melhor detalhamento do processo e possibilitando otimizações.

INTRODUÇÃO

A população mundial aumentou de 2,5 bilhões de pessoas em 1950 para 7,9 bilhões nos dias atuais (Roser *et al.*, 2013). Uma em cada nove pessoas no mundo não tem comida suficiente para levar uma vida saudável e ativa, de acordo com FAO (2015) e SAATH e FACHINELLO (2018).

Este crescimento populacional tem aumentado cada vez mais a demanda por alimentos, e o uso de fertilizantes é um dos fatores predominantes para atender esta demanda (Jakhar *et al.*, 2022). Fertilizantes são produtos compostos por nutrientes que possuem o papel de aumentar a produtividade e o crescimento das plantas e garantir produtos saudáveis, fornecendo o equilíbrio certo de nutrientes ao solo (Reetz, 2017).

Assim como diversos produtos industrializados, os fertilizantes necessitam ser

submetidos ao processo de secagem (Sonsiri *et al.*, 2019) para remoção do excesso de umidade, além de que essa operação facilita o armazenamento, transporte e manuseio do produto seco.

A secagem diz respeito a uma operação unitária de suma importância que é aplicada em várias indústrias como alimentícias, farmacêuticas e de fertilizantes (El-Mesery *et al.*, 2022). Sendo utilizada como principal técnica de conservação de alimentos, ela atua no sentido de evitar, principalmente, a germinação, a contaminação por microrganismos e insetos, de forma a conservar a qualidade do produto por longos períodos (Coulson e Richardson, 1968).

Na secagem de fertilizantes o método mais empregado é por troca de calor direto, onde a corrente de ar quente é forçada a entrar em contato com o sólido úmido, como no secador do tipo rotatório (Silvério *et al.*, 2015).

Um secador rotatório é composto por um tambor cilíndrico horizontalmente inclinado com um pequeno ângulo e gira em baixa velocidade em torno de seu próprio eixo. O diâmetro pode variar de vinte centímetros a três metros e o comprimento pode variar de quatro a dez vezes o seu diâmetro (Perry e Green, 1999).

No estudo de secadores rotativos é importante o conhecimento da fluidodinâmica das partículas no interior do cilindro, uma vez que esse fator influencia no desempenho do equipamento (Souza *et al.*, 2021).

O modelo global de secagem de um secador rotativo, deve ser composto por dois modelos secundários: um referente à fase sólida e outro referente ao equipamento de secagem. O modelo referente a fase sólida relaciona as características, isotermas de equilíbrio e cinética de secagem, enquanto ao modelo de equipamento de secagem, inclui o tipo de secador utilizado, a fluidodinâmica das partículas e o tipo de transferência de calor (Arruda, 2008; Reay, 1989).

A secagem é um assunto abrangente e com alto grau de complexidade, por envolver transferência simultâneas de massa e de calor além de tudo, há um grande número de parâmetros requeridos que podem afetar o processo de secagem, e medidas incorretas desses parâmetros pode levar a erros acumulativos (Kemp e Oakley, 2002).

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo de sensibilidade paramétrica das condições operacionais (temperatura inicial do ar, velocidade do ar e umidade inicial do material) e dos parâmetros de projeto do secador (comprimento e diâmetro), também analisar os efeitos desses parâmetros nas umidades e temperaturas, por meio de simulações gráficas no *Scilab*® em uma determinada faixa de variação.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Modelo

O modelo utilizado nas simulações na secagem de fertilizantes em secador rotatório operando com fluxo contracorrente, juntamente com as condições experimentais é o modelo proposto por Arruda (2008), e o material

utilizado para o estudo fluidodinâmico, foi o fertilizante SSPG (super-fosfato simples granulado). A modelagem em secadores rotatórios, pode ser realizada através de um sistema de equações diferenciais, obtidas através de balanços de massa e energia sobre o elemento infinitesimal de um volume de secador rotatório operando em regime permanente.

Para a determinação dessas equações do modelo, Arruda (2008) adotou as seguintes simplificações:

- A velocidade de escoamento do sólido ao longo do tambor é constante.
- A taxa de secagem é avaliada no elemento infinitesimal de volume do secador.
- As propriedades termodinâmicas do material e do ar são constantes ao longo do secador.
- O formato das partículas não se altera durante a secagem.
- O formato e as propriedades físicas do grão não se alteram durante a secagem.
- As condições experimentais iniciais de vazão, temperatura e umidade do sólido e do ar são constantes, como condição inicial, durante todo o processo.
- A inclinação e a rotação do tambor são constantes durante a secagem.
- As partículas de sólido são consideradas uma esfera perfeita.

As distribuições a serem estudadas ao longo do secador são a umidade do ar (W), umidade do sólido (M), temperatura do ar (T_f) e do sólido (T_s) que são calculadas pelo sistema de equações diferenciais definidos pelas Equações (1) a (4), obtidas através de balanços de massa e energia para a água e o ar.

$$\frac{dW}{dz} = \frac{-R_w H^*}{G_f} \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dz} = \frac{-R_w H^*}{G_s} \quad (2)$$

$$\frac{dT_f}{dz} = \frac{U_{va} V (T_f - T_s) + R_w H^* (\lambda + C_{pv} T_f) + U_p \pi D L (T_f - T_{amb})}{G_f (C_{pf} + W C_{pv})} \quad (3)$$

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{U_{va} V (T_f - T_s) + R_w H^* C_{pl} T_s - R_w H [\lambda + C_{pv} (T_f - T_s)]}{G_s (C_{ps} + M C_{pl})} \quad (4)$$

Em que z é o adimensional de comprimento, dado pela razão da posição (x) e o comprimento total do secador (L). Logo, z variando de 0 a 1, refere-se a entrada e saída do secador para secadores rotativos de fluxos contracorrentes.

O sistema de equações diferenciais deve ser resolvido simultaneamente, levando as condições de contorno presentes na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de contorno do modelo

$T_f(z = 1)$	120°C
$T_s(z = 0)$	25°C
$W(z = 1)$	0,048 $kg_{vapor}/kg_{ar\ seco}$
$M(z = 0)$	0,1384 $kg_{vapor}/kg_{sólido\ seco}$

Fonte: Arruda (2008).

Com base nas simplificações adotadas, é necessário estabelecer um conjunto de equações auxiliares que devem aparecer de forma implícita no modelo (Equações 5 a 12) (Silva, 2010).

Taxa de secagem pontual:

$$-R_w = \frac{(MR-1)(M_0 - M_{eq})}{t} \quad (5)$$

Carga total de sólidos no secador:

$$H^* = \tau \times G_s \quad (6)$$

Entalpia do ar úmido:

$$h_f = Cp_f T_f + W(\lambda + Cp_v T_f) \quad (7)$$

Entalpia do sólido úmido:

$$h_s = Cp_s T_s + MCp_t T_f \quad (8)$$

Umidade de equilíbrio (equação de HALSEY modificada):

$$M_{eq} = \frac{-\exp(-0,045T_s - 2,08)}{\ln(UR)}^{1,435} \quad (9)$$

Adimensional de umidade (equação de PAGE):

$$M_R = \exp\left[-0,431 \exp\left(\frac{-121,845}{T_f}\right) t^{0,392}\right] \quad (10)$$

Coefficiente global volumétrico de transferência de calor:

$$U_{va} = 3,535 G_f^{0,289} G_s^{0,541} \quad (11)$$

Coefficiente de calor perdido:

$$U_p = 0,227 G_f^{0,879} \quad (12)$$

Método

Com auxílio do software livre *Scilab*®, foi desenvolvido o código que contemplasse o modelo desenvolvido, e retornasse em forma de gráfico os comportamentos das umidades e temperaturas do sólido e do ar em função do adimensional (z).

Para a análise de sensibilidade paramétrica foram construídos dois diagramas de blocos demonstrando os parâmetros escolhidos e o passo a passo de como foi feita a análise, os diagramas de blocos estão representados pelas Figuras 1 e 2.

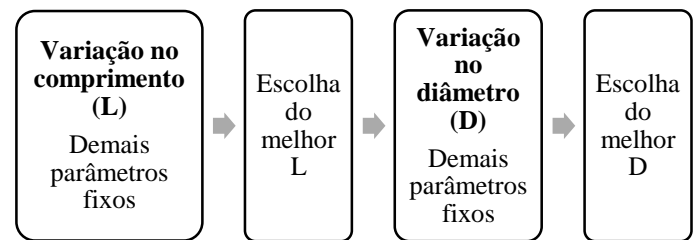


Figura 1: Passo a passo da variação de parâmetros do projeto do secador.

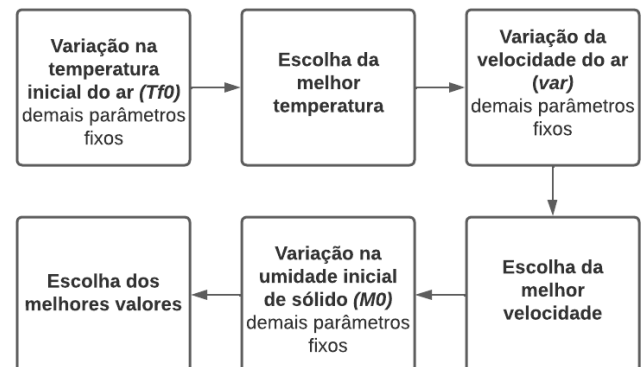


Figura 2: Passo a passo da variação dos parâmetros do projeto do secador.

Os valores de partida de cada parâmetro utilizado no estudo de sensibilidade

paramétrica estão apresentados na Tabela 2. As respostas consideradas para as variações foram as temperaturas e umidades do sólido e do ar na saída do secador.

Tabela 2: Valores de partidas dos parâmetros utilizado no estudo de sensibilidade paramétrica.

$L(m)$	1,40
$D(m)$	0,3
$T_{fo}(^{\circ}C)$	50
$M_0(kg \text{ água}/kg \text{ sólido seco})$	0,1384
$G_s(kg/min)$	0,0175
$v_{ar}(m/s)$	1,5

Fonte: Silva (2010).

No estudo de sensibilidade paramétrica, analisando a variação dos parâmetros de projeto, como indicado na Figura 1, primeiramente, foi realizada a variação do parâmetro comprimento do secador entre os valores de 0,5 a 7,5 m, com intervalos de 1 m. Após a escolha do comprimento, variou-se o diâmetro do secador de 0,15 a 0,75 m, com intervalos de 0,2 m.

As faixas escolhidas para os parâmetros de projeto obedecem a relação comprimento e diâmetro ($4D \leq L \leq 10$) proposta por Perry e Green (1999).

Já a variação das características operacionais, obedeceu a ordem apresentada na Figura 2. Primeiramente, analisou-se a variação da temperatura inicial do ar na faixa de 50 a 75°C, em intervalos de 5°C. Escolhida a melhor temperatura, variou-se a velocidade do ar entre 1,0 a 3,5 m/s, em intervalos de 0,5 m/s. A terceira variável analisada foi a umidade inicial do fertilizante, que foi variada entre 0,11 e 0,16 kg_{água}/kg_{sólido seco}, com intervalo de 0,01 kg_{água}/kg_{sólido seco}.

Os valores escolhidos dos parâmetros tiveram como base a ampla faixa encontrada na revisão da literatura. Os parâmetros operacionais foram escolhidos considerando a avaliação da influência da velocidade do ar, umidade inicial de sólidos e da temperatura sobre a cinética de secagem do fertilizante. O teor de umidade inicial do fertilizante foi escolhido visando possuir valores superiores ao de equilíbrio, para que dessa forma o processo de desorção seja garantido.

As condições experimentais utilizadas na simulação do modelo de secagem do secador rotativo podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros utilizados nas simulações.

$P(\text{pressão})[atm]$	0,907
$MMar(\text{massa molecular do ar})$ [g/mol]	28,89
$D(\text{diâmetro})[m]$	0,3
$T_{amb}(\text{temperatura ambiente})[^{\circ}C]$	27
$\alpha(\text{inclinação do tambor})[^{\circ}]$	3
$tq(\text{tempo de queda})[m]$	0,209
$Yq_{\text{médio}}(\text{altura média de queda})[m]$	0,209
$tr(\text{tempo de residência})[s]$	327
$T_{fo}(\text{temperatura de entrada do gás})[^{\circ}C]$	50
$W_0(\text{umidade absoluta de entrada do ar})[kg \text{ vapor}/kg \text{ ar seco}]$	0,0048
$v_{ar}(\text{velocidade do ar})[m/s]$	1,5
$UR(\text{umidade relativa do ar})$	0,1902
$M_0(\text{umidade do material na entrada})[kg \text{ vapor}/kg \text{ sólido seco}]$	0,1384
$T_{so}(\text{temperatura de entrada do produto})[^{\circ}C]$	25

Fonte: Silva (2010).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os gráficos para as distribuições simuladas do modelo em função do comprimento adimensional do leito (z) nas condições experimentais definidas no estudo da sensibilidade paramétrica.

Foram realizados ensaios fluidodinâmicos para o secador através da variação das seguintes variáveis: comprimento, diâmetro, velocidade do ar, e temperatura do ar. Visando garantir o teor umidade final do produto, a temperatura final dos gases não deve ultrapassar 120°C, e todos os gráficos foram obtidos no software livre *Scilab*®.

Varição do Parâmetro do Projeto de Secador (L)

A Figura 3 apresenta as distribuições de umidades para o sólido (M) e o ar (W) e distribuições de temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f) respectivamente, em função do adimensional do leito (z), para as variações nos valores do parâmetro de comprimento (L) [m].

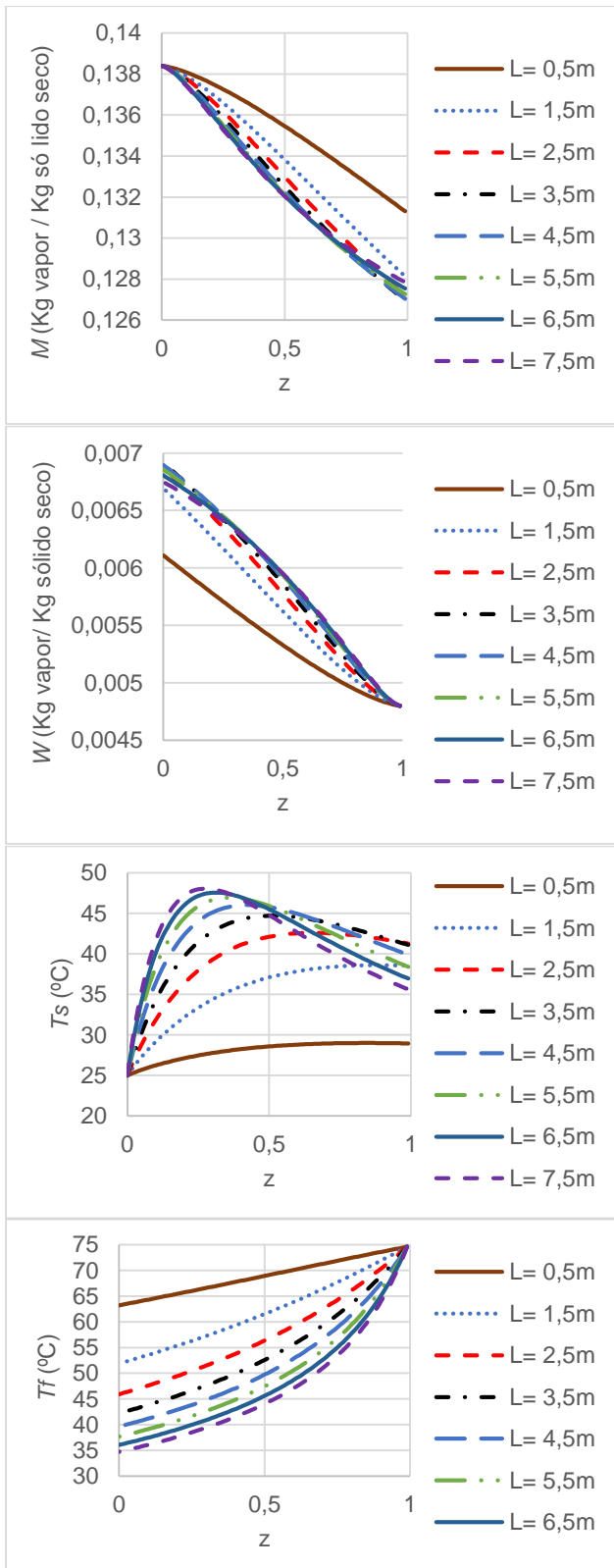


Figura 3: Análise do efeito da variação do comprimento nas Distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), e das temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f).

Pode-se observar para os perfis de distribuições de temperaturas simuladas que o aumento do comprimento contribui para o aumento do tempo de queda das partículas no

secador, dessa maneira aumenta o contato do fertilizante com o gás, o que leva a um acréscimo na temperatura do sólido.

Para a umidade do sólido, à medida que se aumenta o comprimento ocorre uma redução na umidade do fertilizante, visto que aumentando o comprimento o tempo de residência também aumenta, obtendo um produto final mais seco. Porém, dentro a faixa de variação estudada os maiores valores não apresentaram maior redução de umidade, isto pode ser explicado pelo valor do parâmetro de partida do diâmetro ($D = 0,3m$), os maiores valores não obedecem a relação de diâmetro e comprimento proposta por (Perry e Green, 1999).

Diante disso, o melhor valor de comprimento para a faixa analisada e que corresponde a uma redução significativa de umidade, é o comprimento cujo valor é de $L = 3,5$ m. Sendo assim, pode-se concluir que as variações de umidade e temperatura são significativas para a variação de comprimento do secador rotativo.

Variação do Parâmetro do Projeto de Secador (D)

Escolheu-se o valor do comprimento ($L = 3,5m$) e fixou esse valor para a análise da variação do diâmetro na simulação. A Figura 4 apresenta as distribuições de umidades para o sólido (M) e o ar (W) e distribuições de temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f) respectivamente, em função do adimensional do leito (z), para as variações nos valores do parâmetro de diâmetro (D) [m].

Pode-se observar ao analisar a Figura 4, que a temperatura de sólido para os maiores valores de diâmetro aumenta significativamente no início do processo de secagem, tendo uma redução ao longo de (z). Isso leva a crer que a redução nos valores de diâmetro aumenta a área de contato de contato entre o fertilizante e os gases. Portanto, o melhor valor dentro a faixa de variação estudada é o valor que apresentou maior redução de umidade de sólido e maior temperatura do sólido.

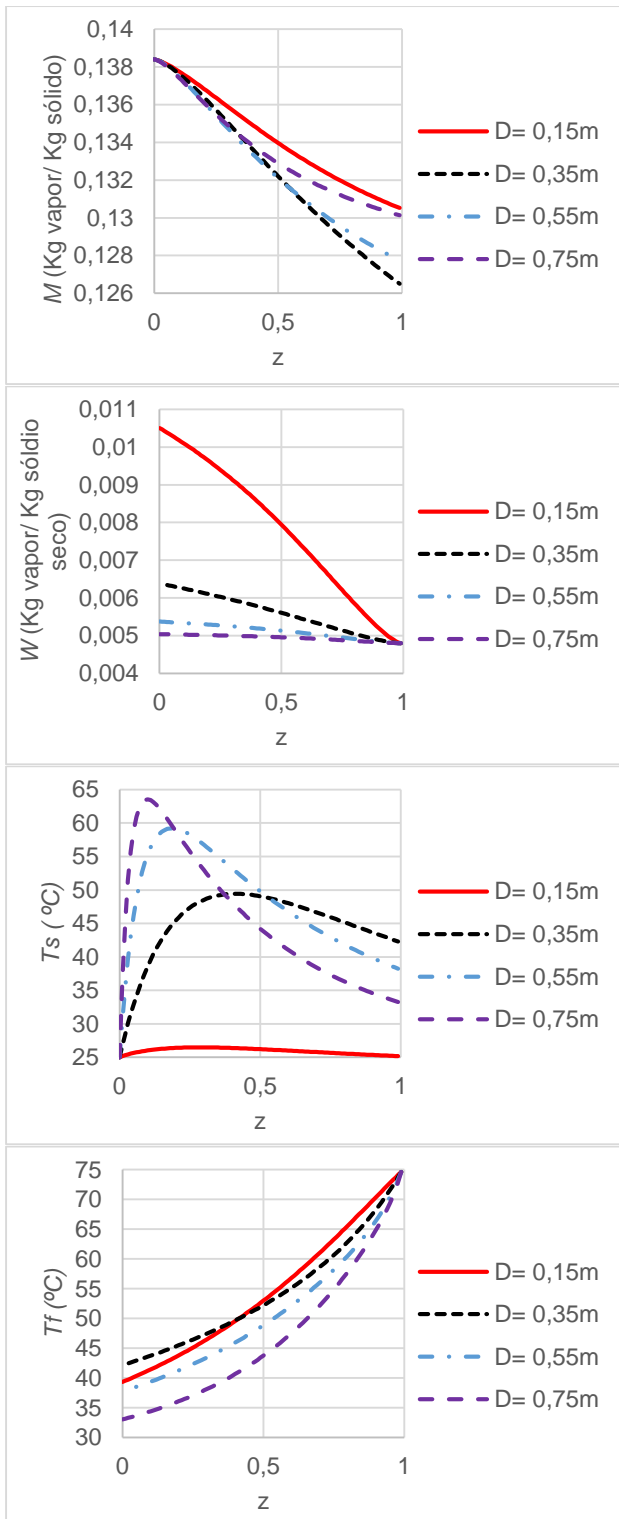


Figura 4: Análise do efeito da variação do diâmetro nas Distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), e das temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f).

Variação do Parâmetro operacional de Secador (T_{f0})

A Figura 5 apresenta as distribuições de temperatura para o sólido (M) e o ar (W) e distribuições de temperaturas do sólido (T_s) e

do ar (T_f) respectivamente, em função do adimensional do leito (z), para as variações nos valores do parâmetro operacional da Temperatura inicial do ar (T_f) [$^{\circ}C$].

O aumento da temperatura inicial faz com que reduza significativamente a umidade do sólido, e aumente a temperatura do sólido e do ar. Portanto o valor de $T = 120^{\circ}C$ é o valor que apresenta maior redução de umidade, uma boa relação de massa de vapor por massa de sólido seco inicialmente e alta temperatura de sólido e uma temperatura do ar de secagem dentro do limite estabelecido.

Variação do Parâmetro operacional de Secador (v_{ar})

A Figura 6 apresenta as distribuições de temperatura para o sólido (M) e o ar (W) e distribuições de temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f) respectivamente, em função do adimensional do leito (z), para as variações nos valores do parâmetro operacional velocidade do ar (v_{ar}) [m/s].

A análise da Figura 6 mostra que o efeito da velocidade do ar na cinética de secagem não foi muito significativo, mostrando pequena variação entre a faixa de variação estudada. O maior valor de velocidade apresentou maior redução de umidade e maior valor de temperatura do sólido, portanto o melhor valor para a velocidade do ar de secagem na saída do secador é o valor correspondente a $v_{ar} = 3,5 m/s$.

Variação do Parâmetro operacional de Secador (M_0)

A Figura 7 apresenta as distribuições de umidades para o sólido (M) e o ar (W) e distribuições de temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f) respectivamente, em função do adimensional do leito (z), para as variações nos valores do parâmetro da umidade inicial do sólido (M_0) [$kg \text{ água} / kg \text{ sólido seco}$].

Através da Figura 7, nota-se que o parâmetro da umidade inicial do sólido não apresentou variação significativa para a umidade do ar, temperatura do sólido e temperatura do ar de secagem. Mostrando apenas variação na umidade do sólido, o que é esperado, visto que o aumento de umidade

inicial faz com que tenha mais fertilizante e dificulta a remoção de umidade.

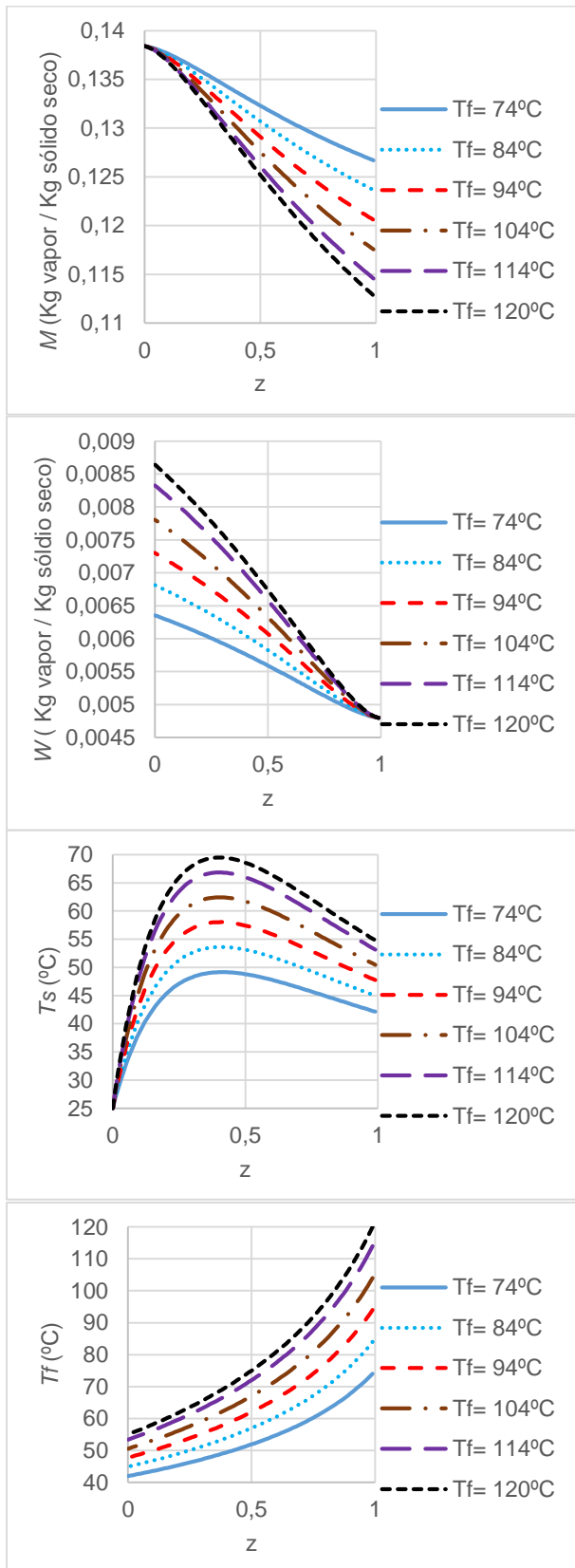


Figura 5: Análise do efeito da variação da temperatura inicial de ar nas Distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), e das temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f).

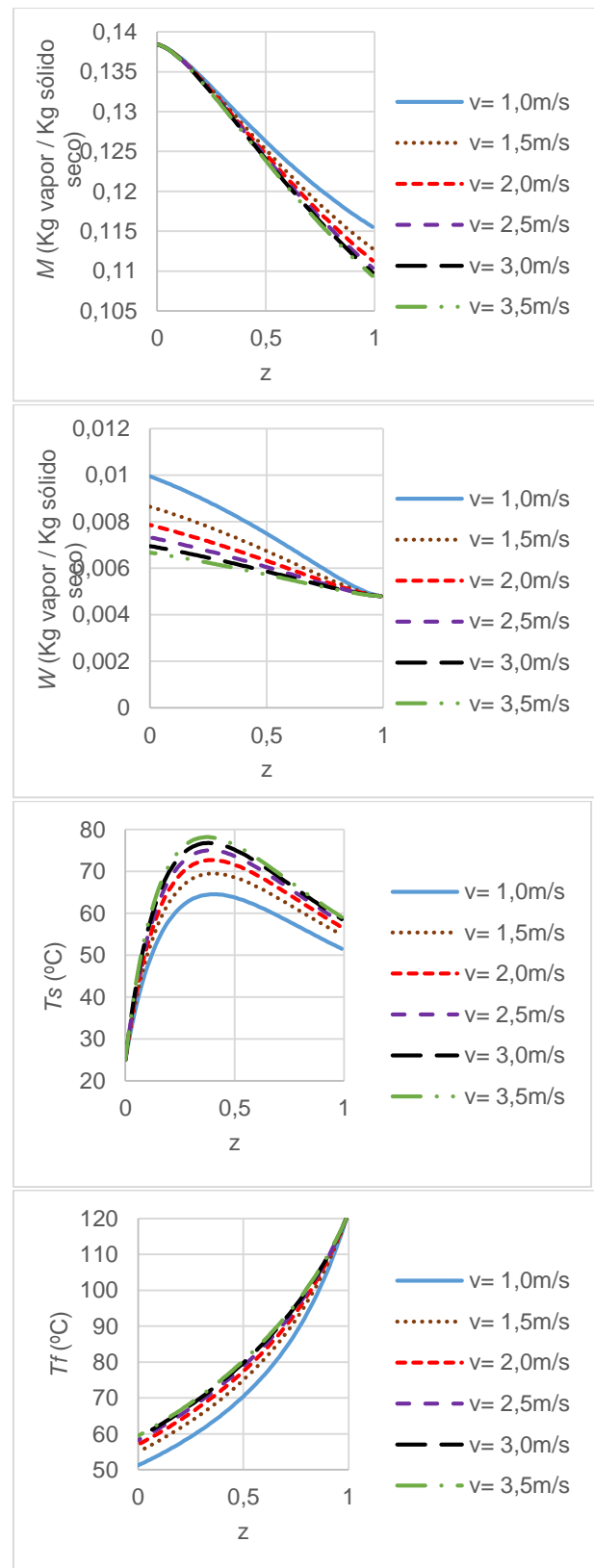


Figura 6: Análise do efeito da variação da velocidade do ar nas Distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), e das temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f).

Todos os valores de M_0 dentro da faixa analisada poderiam ser utilizados, mas tendo em vista a otimização para o modelo, o valor de

$M_0 = 0,11$ foi o escolhido por apresentar a maior redução de umidade do sólido e maior temperatura de sólido.

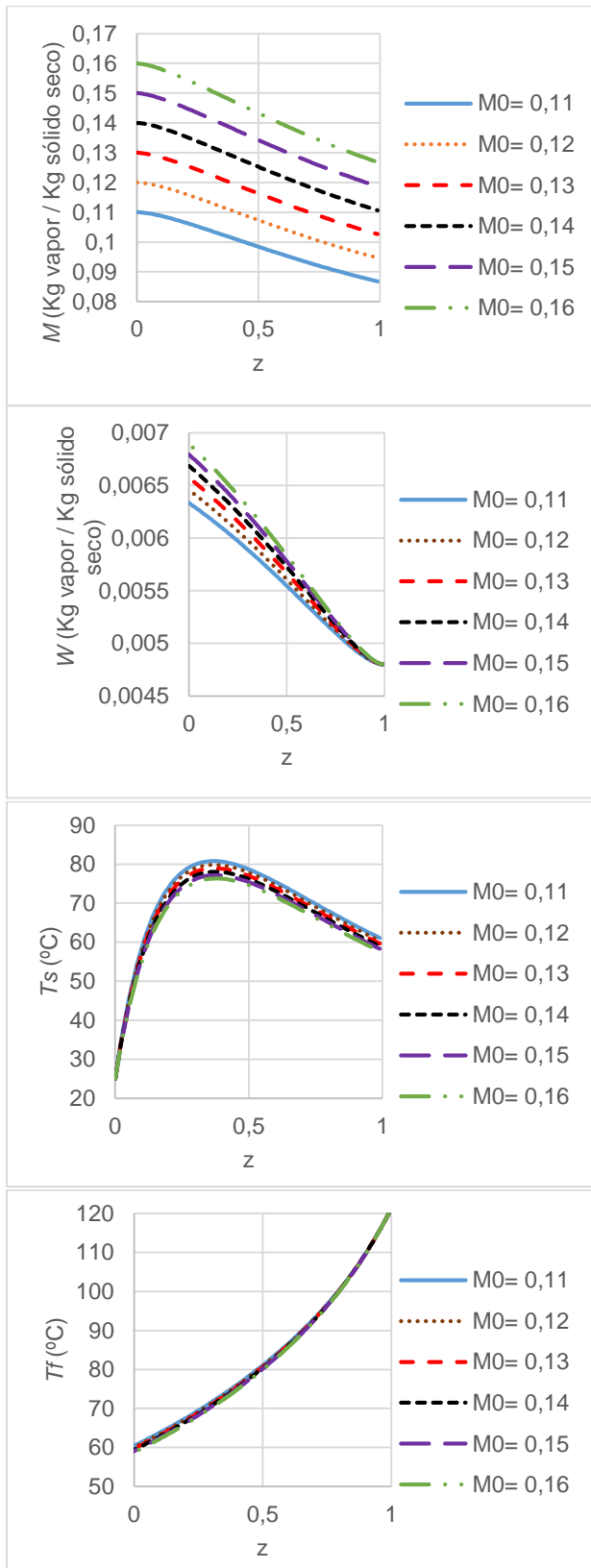


Figura 7: Análise do efeito da variação da velocidade do ar nas Distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), e das temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f).

Com os valores escolhidos pela análise de sensibilidade paramétrica realizada anteriormente, tem-se a Tabela 4, e com estes valores, é possível fazer a simulação para as distribuições de umidade e temperatura, apresentado na Figura 8.

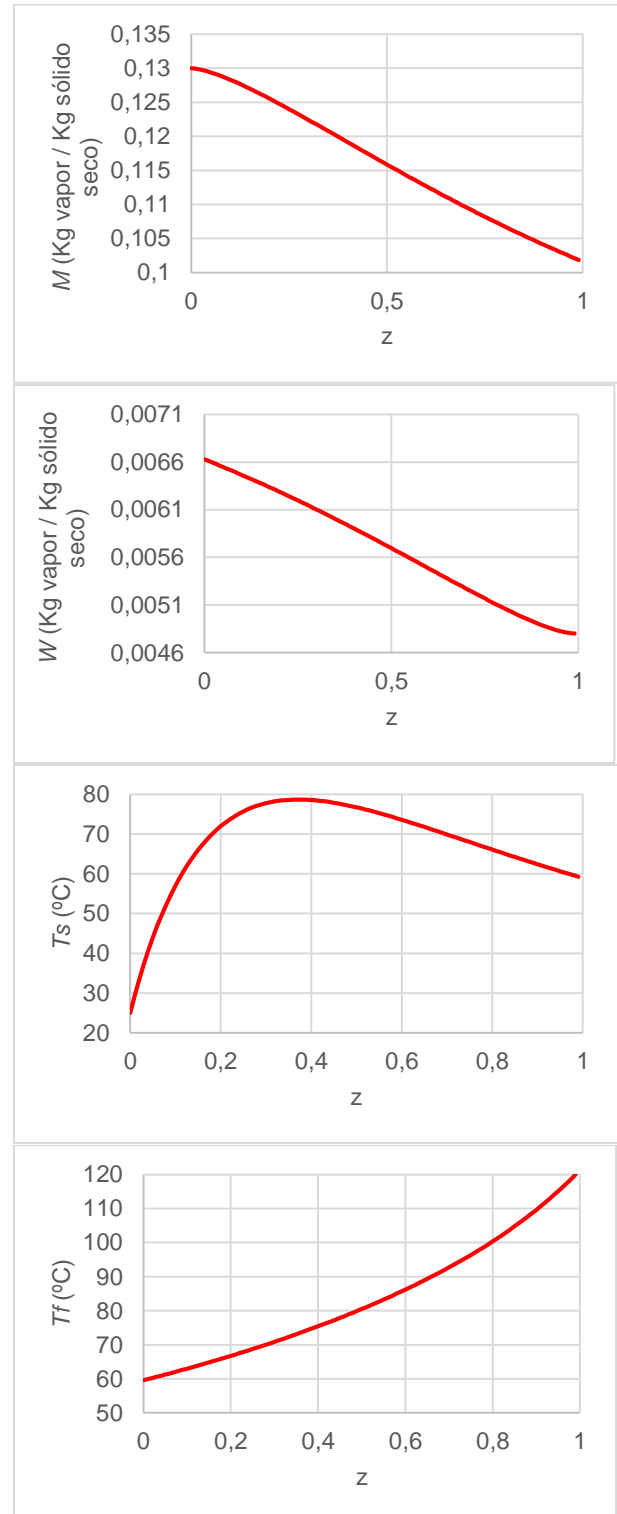


Figura 8: Análise do efeito da variação da velocidade do ar nas Distribuições de umidade do sólido (M) e do ar (W), e das temperaturas do sólido (T_s) e do ar (T_f).

Tabela 4: Parâmetros escolhidos na sensibilidade paramétrica.

$L(m)$	3,50
$D(m)$	0,35
$T_{fo}(^{\circ}C)$	120
$var(m/s)$	3,5
$M_0(kg \text{ água}/kg \text{ sólido seco})$	0,11

A distribuição final obtida pela análise de sensibilidade paramétrica, apresenta valores reduzidos para umidade do sólido e uma alta temperatura de sólido quando comparados a simulação com os valores de partida, além de que atinge temperaturas finais dentro do limite estabelecido, podendo assim ser utilizada sem danificar o material ou o secador.

CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi apresentado as simulações distribuídas de umidades e temperaturas e os parâmetros analisados foram o comprimento (L), diâmetro (D), temperatura inicial do ar (T_{fo}), velocidade do ar (v_{ar}), e umidade inicial do sólido (M_0).

Foi realizado um estudo de sensibilidade paramétrica no secador rotatório operando com fluxo contracorrente dentro de uma faixa de variação dos parâmetros estudados e determinado as melhores condições operacionais e de projeto de modo que satisfazem as recomendações da literatura.

As simulações realizadas para verificar a influência das condições operacionais e de projeto sobre os perfis de distribuições de umidade (M) e (W) e de temperatura (T_s) e (T_f) mostraram que as variáveis comprimento, diâmetro e temperatura inicial do sólido alteraram significativamente os perfis de umidade e temperatura, observa-se para estes parâmetros que à medida que se aumenta o valor dessas variáveis, ocorre uma redução na umidade do sólido e um aumento da temperatura do sólido, favorecendo o processo de secagem.

A partir da análise de sensibilidade paramétrica, foi obtido a distribuição final para o modelo de secagem em um secador rotativo, esta simulação apresentou baixos valores de umidade e alta temperatura de sólido, mostrando eficiência no processo de beneficiamento de secagem do fertilizante.

Desse modo, o conhecimento dos valores mais significativos dos parâmetros melhora à previsibilidade do modelo e contribui para um melhor processo de secagem, proporcionando um aumento de eficiência no projeto de novos equipamentos e possibilitando melhorias em equipamentos já instalados.

NOMENCLATURA

A : área da seção transversal do secador rotatório (m^2)

C_{pf} : calor específico do fluido ($kJ \text{ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}C$)

C_{pl} : calor específico do líquido ($kJ \text{ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}C$)

C_{ps} : calor específico do sólido ($kJ \text{ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}C$)

C_{pv} : calor específico do sólido ($kJ \text{ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}C$)

D : diâmetro do secador (m)

$f t_{ef}$: fator de tempo efetivo

G_f : vazão mássica de ar seco (kg/s)

G_s : vazão mássica de sólido seco (kg/s)

H : entalpia ($kJ \text{ kg}^{-1}$)

h^* : carga total do secador (kg)

h_f : entalpia do ar úmido ($kJ \text{ kg}^{-1}$)

h_s : entalpia do sólido úmido ($kJ \text{ kg}^{-1}$)

L : comprimento do secador (m)

M : umidade do sólido, massa de água por massa de sólido seco ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sól.seco}}$)

M_{eq} : umidade de equilíbrio do material ($kg \text{ kg}^{-1}$)

M_0 : umidade inicial do material ($kg \text{ kg}^{-1}$)

M_R : adimensional de umidade (-)

R_W : taxa de secagem do material (s^{-1})

t : tempo (s)

t_{ef} : tempo efetivo (s)

T_f : temperatura do fluido [$^{\circ}C$]

T_s : temperatura do sólido [$^{\circ}C$]

U_{va} : coeficiente global de transferência de calor ($kW \text{ m}^{-2} \text{ }^{\circ}C$)

U_R : umidade relativa do ar (-)

U_P : coeficiente de calor perdido ($kW \text{ m}^{-2} \text{ }^{\circ}C^{-1}$)

V : volume do secador (m^3)

v_f : velocidade superficial do ar (m/s)

W : umidade absoluta do ar, massa de água por massa de ar seco ($kg \text{ kg}^{-1}$)

x : posição ao longo do secador (m)

z : adimensional de comprimento (-)

REFERÊNCIAS

ARRUDA, E. B. (2008) Comparação do Desempenho do Secador Roto-Fluidizado com o Secador Rotatório

Convencional: Secagem de Fertilizantes, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG.

- COULSON, J. M., RICHARDSON, J. F. (1968) Tecnologia Química: Operações Unitárias. 2. ed. Vol. 2. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- EL-MESERY, H. S., TOLBA, N. M., KAMEL, R. M. (2022). Mathematical modelling and performance analysis of airflow distribution systems inside convection hot-air dryers. *Alexandria Engineering Journal*.
- FAO (2015) How to feed the world in 2050. High level expert forum. Convened at FAO Headquarters in Rome on 12-13 October.
- JAKHAR, A. M., AZIZ, I., KALERI, A. R., HASNAIN, M., HAIDER, G., MA, J., ABIDEEN, Z. (2022). Nano-fertilizers: A sustainable technology for improving crop nutrition and food security. *NanoImpact*, 100411.
- KEMP, I. C., OAKLEY, D. E. (2002) Modeling of Particulate Drying in Theory and Practice. *Drying Technology*, v. 20, p. 1699-1750.
- PERRY, R. H., GREEN, D. W. (1999) Perry's Chemical Engineers' Handbook. Mac Graw-Hill, 7th Cd-ROM, Nova York, Estados Unidos.
- REAY, D. (1989) A scientific approach to the design of continuous flow dryers for particulate solids. In: HEWITT, G. F.; DLHAYE, J. M.; ZUBER, N. *Multiphase Science and Technology*. Hemisphere Pub. Corp., v.4, p.1-102.
- REETZ, H. F. (2017). Fertilizantes e o seu uso eficiente. *São Paulo: ANDA*, 178.
- ROSER, M., RITCHIE, H., ORTIZ-OSPINA, E. (2013), World Population Growth, in <https://ourworldindata.org/world-population-growth>, atualizado em 2019.
- SAATH, K. C. D. O., FACHINELLO, A. L. (2018). Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 56, 195-212.
- SILVA, M. G. (2010) Análise de Sensibilidade Paramétrica na Modelagem da Secagem de Fertilizantes em Secador Rotatório, Tese de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG.
- SILVÉRIO, B. C., ARRUDA, E. B., DUARTE, C. R., BARROZO, M. A. S. (2015). A novel rotary dryer for drying fertilizer: comparison of performance with conventional configurations. *Powder Technology*, 270, 135-140.
- SONSIRI, A., PUNYAKUM, V., RADPUKDEE, T. (2019). Optimal variables estimation for energy reduction via a remote supervisory control: application to a counter-flow rotary dryer. *Heliyon*, 5(1), e01087.
- SOUZA, G. F. M. V., AVENDAÑO, P. S., FRANCISQUETTI, M. C. C., FERREIRA, F. R. C., DUARTE, C. R., BARROZO, M. A. S. (2021). Modeling of heat and mass transfer in a non-conventional rotary dryer. *Applied Thermal Engineering*, 182, 116118.