

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

PAULO COELHO KOTCHETKOFF

USO DE PROGRAMAS GRATUITOS PARA A
SIMULAÇÃO DINÂMICA DA SECAGEM EM LEITO
FIXO COM REVERSÃO

SÃO CARLOS -SP
2022

PAULO COELHO KOTCHETKOFF

USO DE PROGRAMAS GRATUITOS PARA A SIMULAÇÃO DINÂMICA DA SECAGEM EM
LEITO FIXO COM REVERSÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

São Carlos-SP
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou o Trabalho de Graduação do candidato Paulo Coelho Kotchetkoff, realizada em 12/09/2022:

Prof. Dr. Adriana Paula Ferreira Palhares
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Fábio Bentes Freire
Universidade Federal de São Carlos

Prof. MSc. Thalyne de Almeida Ferreira Rocha
Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTO

Primeiramente ao meu orientador, Prof. Fábio Bentes Freire, por ter aceitado me orientar, mesmo quando o tema inicial se mostrou inviável. Por ter me guiado, ensinado, incentivado, ser amigável, colaborativo e ter compartilhado comigo os momentos de felicidade conforme progredia neste projeto. Agradeço também os outros docentes da UFSCar pelos quais fui instruído ao longo de minha graduação, o ensino que me foi dado me transformou.

Posteriormente aos meus pais, Maria Angélica e André Paulo, pela criação e pelo presente, que sempre foram repletos de amor, zelo, ensinamentos, companheirismo e compreensão. Obrigado por terem me preparado para ser uma pessoa independente e pelos valores de bondade que inculcaram em mim com suas palavras e principalmente com o exemplo que me deram.

À minha querida irmã, Júlia, tenho muito a agradecer pelas inúmeras conversas ao longo da vida, que muito contribuíram para meu crescimento, assim como por ter me ensinado sobre temas como filosofia, arquitetura e estética. Certamente sou uma pessoa mais dedicada, correta e autoconsciente por sua constante companhia e cuidado.

Às minhas amigas de Uberlândia, é uma honra ser parte da vida de vocês, uma parcela considerável da minha criação e de quem eu sou se deve à nossa amizade e muita da minha alegria advém de nossas interações, muito obrigado.

Às minhas amigas que fiz ao longo da faculdade em São Carlos, vocês são para mim como minhas amigas de Uberlândia, amigos de infância. Sem o afeto e a parceria de vocês este trabalho de graduação não seria possível, obrigado por todos os momentos, árduos e tranquilos, vividos ao longo da graduação e antecipadamente pelos que virão.

Finalmente, à vida, por ser um espetáculo.

“No que diz respeito à arte de viver, o material é sua própria vida. Não se pode criar grandes coisas de uma hora para outra. É preciso tempo. Dê o melhor de si e seja sempre bom”.

Epicteto.

RESUMO

Modelos matemáticos são amplamente utilizados no projeto, controle e otimização de sistemas. Com a popularização do computador como ferramenta acessível e os avanços na informática, é cada vez mais comum incluir a simulação computacional como etapa fundamental no desenvolvimento de processos químicos. As altas demandas energéticas dentro da área de secagem levam a exigências mais criteriosas com relação à eficiência dos equipamentos utilizados. Motivados em melhorar a eficiência da secagem, a área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar desenvolveu uma célula de estudo em leito fixo destinada principalmente à verificação de modelos do processo. A célula permite a mudança de sentido no escoamento de ar, fazendo com isso que diminuam os gradientes de temperatura e de umidade dentro do leito. Foram, então, obtidos e verificados experimentalmente modelos dinâmicos com vários graus de complexidade, sendo que recentemente, chegou-se a um modelo de duas fases implementado em Matlab que descreve com boa concordância a secagem de alumina em leito fixo espesso. Devido à presença majoritária de água livre (secagem mais fácil) e à sua simplicidade estrutural, a alumina foi o grão padrão utilizado nas simulações da secagem com reversão de escoamento. O presente Trabalho de Graduação teve por objetivo simular a secagem de alumina em leito fixo espesso com reversão de escoamento de ar usando o modelo de duas fases, convertendo o *script* Matlab em Scilab e Python. Os resultados das simulações foram comparados com a operação convencional do leito fixo para mostrar efetivamente a redução dos gradientes de temperatura e de umidade alcançada com a técnica de reversão.

Palavras-chave: Secagem. Alumina. Simulação.

ABSTRACT

Mathematical models are widely used in the design, control, and optimization of systems. With the growing popularization of the computer as an accessible tool and technology advances, it is increasingly common to include computer simulation as a fundamental step in the development of chemical processes. The high energy demands in the drying process lead to stricter requirements regarding the efficiency of the equipment used. In order to improve drying efficiency, the DEQ/UFSCar Particulate Systems developed a thick fixed bed primarily intended to verify process models. The cell allows changing the direction of the airflow, causing the decrease of the temperature and moisture gradients inside the bed. Were then derived and experimentally verified dynamic models with different degrees of complexity, and recently, a two-phase model was implemented in Matlab that describes with a good agreement the drying of alumina in the thick fixed bed. Because the alumina has essentially free water (easier drying) and is structurally simple, it was the standard grain used in drying simulations with airflow reversal. The present Final Undergraduate Paper aims to simulate the drying of thick fixed bed alumina with airflow reversal using the two phases model, converting the Matlab script into Scilab and Python. The simulation results were compared to the conventional fixed bed operation to see if it effectively reduced the temperature and moisture gradients achieved with the reversal technique.

Keywords: Drying. Alumina. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de um silo secador em leito fixo com representação da frente de secagem.....	16
Figura 2 – Ilustração do leito fixo, com e sem reversão.	18
Figura 3 – Esquemática de uma curva de secagem.....	20
Figura 4 – Gráfico da taxa de secagem em função da umidade do material.	20
Figura 5 – Esquemática do módulo de secagem usado nas simulações.	26
Figura 6 – Esquemática do funcionamento do sistema de válvulas para gerar escoamento (a) ascendente e (b) descendente.	27
Figura 7 – Esquemática da separação de um leito de 10 cm em dez leitos de 1 cm cada.	28
Figura 8 – Gráficos dos resultados da simulação da secagem com inversão do sentido de escoamento do ar de secagem em Matlab.	31
Figura 9 – Gráficos dos resultados da simulação da secagem com inversão do sentido de escoamento do ar de secagem em Scilab.	32
Figura 10 – Gráficos dos resultados da simulação da secagem com inversão do sentido de escoamento do ar de secagem em Python.....	33
Figura 11 – Gráficos dos resultados da simulação da secagem sem inversão do sentido de escoamento do ar de secagem em Matlab.....	36
Quadro 1 – Propriedades físicas da alumina.	25
Quadro 2 – Valores de operação utilizados nas simulações.....	29
Quadro 3 – Resumo das diferenças percentuais entre as simulações em Python e Scilab.	34
Quadro 4 – Resumo das diferenças percentuais entre as simulações em Python e Matlab.	34
Quadro 5 – Resumo das diferenças percentuais entre as simulações em Scilab e Matlab.	35

NOMENCLATURA

Lista de símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
a	Área superficial do sólido por unidade de volume	[m ⁻¹]
C_p	Calor específico	[KJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
E_a/R	Parâmetro da equação da constante de secagem	[K]
f	Transferência de massa entre fases	[kg m ⁻³ s ⁻¹]
G_f	Fluxo mássico da fase fluida	[kg m ⁻² s ⁻¹]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W m ⁻² K ⁻¹]
k	Constante de secagem	[s ⁻¹]
k₀	Parâmetro da equação da constante de secagem	[s ⁻¹]
t	Tempo	[min]
T	Temperatura	[°C]
T_{m0}	Temperatura inicial do leito	[°C]
X	Umidade em base seca	[-]
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	[-]
Y	Umidade absoluta do ar	[L]
z	Coordenada da direção de escoamento do ar	[m]

Letras gregas

ε	Porosidade do leito	[-]
λ	Calor específico de vaporização	[KJ kg ⁻¹]
ρ	Densidade	[kg m ⁻³]

Subscritos

f	Fase fluida (ar de secagem)
l	Água líquida
mix	Mistura das fases sólida e fluida
s	Fase sólida (alumina)
v	Vapor d'água
0	Inicial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 EQUAÇÕES RÍGIDAS	13
2.2 MATLAB, SCILAB E PYTHON	13
2.3 ALUMINA.....	14
2.4 SECAGEM.....	15
2.4.1 Secagem em Leito Fixo	15
2.4.2 Secagem em Leito Fixo com Reversão no Sentido do Escoamento de Ar	17
2.4.3 Secagem em Camada Fina	18
2.4.4 Secagem em Camada Espessa	21
2.5 MODELO DE DUAS FASES DE MASSARANI E TELLES	21
2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 MATERIAIS.....	25
3.2 MÓDULO DE SECAGEM.....	26
3.3 MODELO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES.....	27
3.4 PARÂMETROS E SIMULAÇÃO.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5 CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

Empreender mudanças é frequentemente uma tarefa complexa para diversas organizações e empresas, por vezes exigindo para tanto a modelagem de sistemas complexos, como, por exemplo, os de produção industrial. Nesse contexto, a simulação ganhou protagonismo nos últimos anos, haja visto que permite aos projetistas idealizar inovações e entender, sem a necessidade de implementação do sistema em si, seu comportamento dinâmico, seja ele uma sala de operações ou uma linha de produção. Ou seja, a simulação pode ser utilizada para estudar e comparar diferentes alternativas de projeto, buscando entender como o novo sistema pode se comportar. De modo similar, permite também melhor entender como alterações modificam sistemas já existentes, economizando dessa maneira tanto tempo quanto custo de implementação, tendo assim emergido como etapa crucial para desenvolvimentos na produção industrial no século 21 (HOSSEINPOUR, F.; HAJIHOSSEINI, H., 2009).

A secagem é uma das operações unitárias mais presentes nas indústrias alimentícia e farmacêutica, podendo ser descrita como o processo de remoção de umidade em excesso de um material de interesse a partir da transferência simultânea de calor e de massa (MCCABE et al., 1993). É um processo que visa sobretudo aumentar a durabilidade do produto, facilitando também seu transporte, uma vez que reduz o peso do material com a remoção da umidade em excesso.

Há diferentes tipos de secadores, como os de leito fixo, os de leito móvel e os rotativos, sendo que o tipo de secador empregado neste trabalho é o de leito fixo, que promove a secagem por convecção entre as fases. Durante a secagem em leito fixo, os sólidos permanecem estáticos, enquanto o ar de secagem, quente e seco, percola os interstícios, fazendo com que ocorra transferência de energia em forma de calor da fase fluida para a fase sólida, o que por sua vez promove a evaporação da fase líquida presente no sólido (SHERWOOD, 1929a).

Uma das vantagens de realizar secagem em leito fixo é que, pelo fato de o material permanecer estático durante o processo, o impacto mecânico é muito pequeno quando comparado com outras técnicas de secagem, o que pode ser determinante na qualidade final do produto, por exemplo, no caso de sementes.

Contudo, a secagem em leito fixo gera gradientes de umidade e temperatura ao longo do leito, levando a uma falta de uniformidade no produto final que pode inclusive prejudicar sua qualidade final ou mesmo reduzir seu tempo de prateleira. Uma alternativa para reduzir esses gradientes é operar o leito fixo com reversão do sentido de escoamento do ar de secagem, mesmo que sejam maiores os gastos energéticos para a realização da secagem, que já é um processo bastante custoso energeticamente.

Usando a alumina, um sólido de estrutura interna simples e invariante, o que facilita a modelagem do processo, Genaro (2021) desenvolveu e verificou experimentalmente um modelo para sua secagem em leito fixo espesso com reversão do sentido de escoamento do ar de secagem, tendo como resultado de seu trabalho um código utilizando a linguagem de programação Matlab.

Este trabalho teve como meta simular a secagem de alumina em leito fixo espesso com reversão de sentido de escoamento de ar de secagem a partir do modelo de duas fases desenvolvido por Massarani e Telles (1992), convertendo o *script* Matlab em Scilab e Python. Os resultados das simulações foram comparados com os de uma operação sem reversão do sentido de escoamento do ar de secagem em leito fixo para observar a efetiva redução dos gradientes de temperatura e de umidade alcançada com a técnica de reversão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é feita uma introdução dos softwares Matlab, Scilab e Python. Também são apresentadas propriedades da alumina, assim como algumas características do equipamento e da operação com e sem reversão de sentido do escoamento do ar de secagem.

Inicialmente, são revistos conceitos como equações rígidas, secagem em camada fina e secagem em camada espessa.

2.1 EQUAÇÕES RÍGIDAS

Uma equação rígida - embora não exista uma definição matemática precisa de rigidez - é uma equação diferencial para a qual certos métodos numéricos para resolvê-la são numericamente instáveis, isso é, a equação possui termos que podem levar a uma rápida variação na solução caso o tamanho do passo para sua resolução seja considerado extremamente pequeno. O que torna o modelo de reversão utilizado neste trabalho numericamente rígido é a mudança do sentido de escoamento do ar de secagem. Todos os termos de entrada/saída das equações de balanço nos extremos do leito sofrem uma brusca mudança quando há inversão.

2.2 MATLAB, SCILAB E PYTHON

O Matlab é um *software* pago desenvolvido e mantido pela MathWorks que possui aplicações na biologia computacional, no aprendizado de máquina, na simulação, na otimização e no controle de sistemas, assim como também no processamento de imagem e de sinal. Foi introduzido ao público pela primeira vez em 1979, quando ainda era gratuito. Desde 1984, contudo, se tornou um *software* pago.

O Scilab, por sua vez, é um *software* gratuito usado principalmente para matemática, simulação, otimização e controle de sistemas, assim como

processamento de imagem e de sinal. Passou a ser distribuído ao público no princípio da década de 1990 com sintaxe semelhante à do Matlab, sendo posteriormente adquirido em 2017 pelo ESI Group, que se comprometeu a manter o software gratuito. Por fim, Python é atualmente a linguagem de programação mais popular do mundo, foi concebida no final da década de 1980 por Guido van Rossum, que foi desenvolvedor chefe dela até 2018. É comumente utilizada para desenvolvimento web, computação científica, análise de dados, aprendizado de máquina e inteligência artificial.

Neste trabalho, um foco importante foi converter um script criado em Matlab tanto para Scilab quanto para Python e comparar os resultados obtidos, tendo em vista que essas três linguagens de programação possuem recursos para resolver equações rígidas.

2.3 ALUMINA

É como usualmente é conhecido o óxido de alumínio (Al_2O_3), sendo o processo Bayer o mais empregado para a sua produção, que utiliza como uma de suas matérias primas a bauxita, uma rocha avermelhada encontrada na natureza da qual o Brasil possui uma das cinco maiores jazidas do mundo. A bauxita é considerada economicamente aproveitável se o percentual de alumina na rocha for entre 50 e 55% (SAMPAIO et al., 2005).

Neste trabalho optou-se pela alumina por ser um material que, diferente de sementes e grãos, frequentemente encontrados em estudos de secagem, é um material inorgânico cujas propriedades físicas não variam significativamente ao longo do processo de secagem, permitindo que a complexidade matemática de sua modelagem seja reduzida (SOUSA, 2017). Além da geometria esférica, as partículas de alumina são feitas de um único material, não têm casca e não encolhem durante a secagem. Calçada et al. (2006) associam a alta porosidade e estrutura física da alumina com a baixa resistência às transferências de massa e de calor. Isso ocorre pois grãos de alumina são capazes de transferir umidade ao ar com a mesma facilidade com que recebem umidade do ar, o que não acontece no caso de sementes

e de grãos de espécies vegetais em que há uma clara diferença entre a entrada e a saída de água (histerese).

2.4 SECAGEM

É um processo que visa retirar o excesso de água em um determinado produto por evaporação via transferência simultânea de calor (do ar de secagem para o produto) e de massa (água transferida do produto para o ar de secagem) (BROOKER et al., 1992). Esse processo ocorre devido à diferença de pressão de vapor entre a superfície do produto e o ar de secagem. Durante o processo de secagem ocorre a movimentação da água do interior para a superfície do produto para que ocorra a evaporação. Os mecanismos mais importantes para a movimentação da água no produto durante o processo de secagem são: a difusão líquida, a qual ocorre devido à existência do gradiente de concentração de teor de água; a difusão de vapor, devido ao gradiente de pressão de vapor causado pelo gradiente de temperatura para vaporizar a água contida no produto; e pelo fluxo de líquido e vapor, que ocorrem devido a diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e temperatura elevada (PARK et al., 2007).

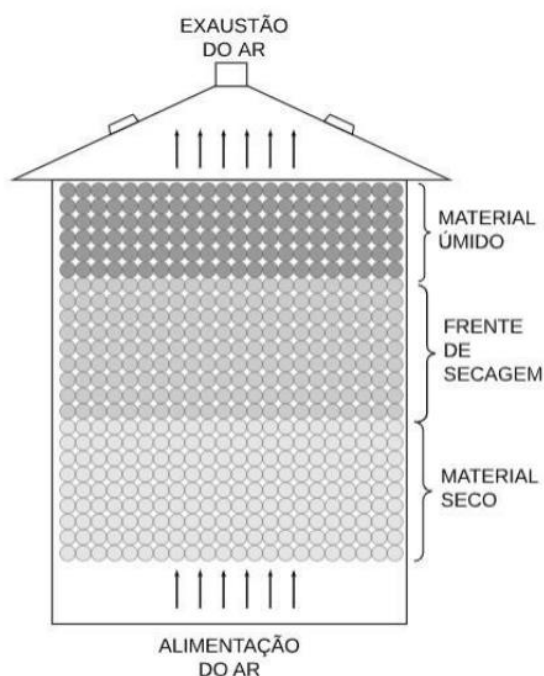
2.4.1 Secagem em Leito Fixo

Para a realização do processo de secagem, são utilizados equipamentos projetados para promover um bom contato entre a fase fluida e a fase sólida. Alguns exemplos de tipos de secadores são: de leito fixo, de leito móvel, secador tipo esteira rolante e o rotativo, amplamente encontrado em aplicações industriais. Secadores de leito fixo possuem baixo custo de construção e implementação, assim como configurações simples, sendo constituídos por uma câmara cilíndrica com as extremidades perfuradas que permitem a passagem do ar de secagem, que percola forçadamente o produto de interesse, que fica em repouso dentro dela. São opções para realizar a secagem de uma gama de produtos, tais quais produtos agrícolas e

alimentos (MOURA, 2001). A esteira rolante é uma forma de leito fixo em que a secagem ocorre de maneira contínua.

Durante o processo convencional de secagem em leito fixo, ar aquecido é inserido na base do secador em sentido ascendente e percola pelos espaços vazios entre as partículas do produto, fazendo com que a umidade nelas presente seja retirada e transportada até o exterior do secador junto com a corrente de ar da exaustão. O produto, por sua vez, transfere umidade para o ar aquecido, de modo que o ar de alimentação do secador, seco e quente, vai sendo resfriado e saturado conforme percola as partículas do produto, levando à formação de uma frente de secagem, na qual a parcela do produto úmido mais próxima à alimentação de ar quente é aquecida e seca antes que a que se encontra mais próxima à exaustão do secador, formando gradientes de temperatura e de umidade (BARROZO et al., 2014), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de um silo secador em leito fixo com representação da frente de secagem.



Fonte: Genaro (2021).

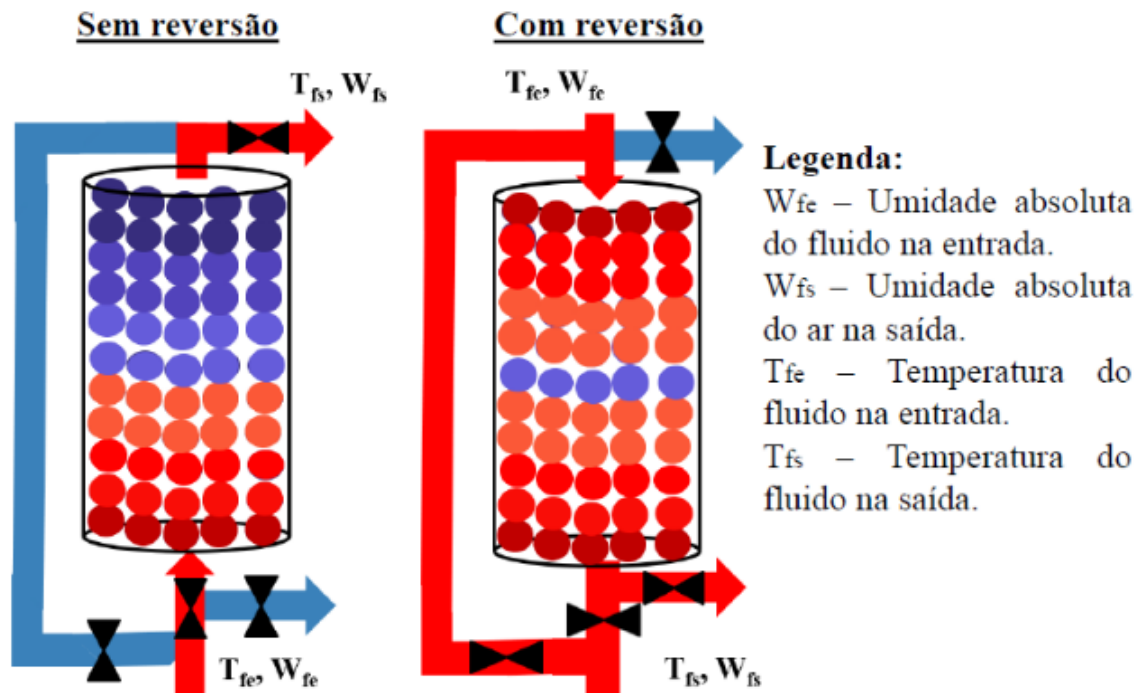
Há casos em que não se deseja que se forme uma frente de secagem única, haja visto que ela pode interferir negativamente na uniformidade e qualidade do produto, como no caso de secagem de sementes, em que altas temperaturas podem dificultar ou impedir a sua germinação (RATTI e MUJUMDAR, 1995; PORDAGE e LANGRISH, 2007; BARROZO et al. 2014; BALA, 2017; ALBINI, 2019). Na secagem em leito fixo espesso com reversão, duas frentes de secagem partindo da base e do topo do equipamento atuam para melhor homogeneizar o produto.

2.4.2 Secagem em Leito Fixo com Reversão no Sentido do Escoamento de Ar

A fim de evitar a formação de gradientes significativos de temperatura e de umidade na secagem é possível, ao invés de se utilizar um secador de leito fixo, optar por outro tipo de equipamento, como tambores rotativos, leitos de jorro ou fluidizados. Contudo, pode ser que o produto de interesse seja sensível aos choques mecânicos, de modo que essas alternativas ao leito fixo talvez danifiquem o produto final. Para diminuir tanto os gradientes de temperatura e umidade indesejados, assim como danos por impactos mecânicos na secagem, é possível usar um leito fixo, porém com inversão periódica do sentido de escoamento do ar (CHUA et al., 2003; ALBINI, 2019; GENARO, 2021).

A técnica da reversão de escoamento possui duas variáveis relevantes para otimizar a secagem: t_0 , o momento em que pela primeira vez o sentido de escoamento é invertido, como também Δt , o intervalo entre as reversões (DAVILA et al., 1983; RATTI e MUJUMDAR, 1995, GENARO, 2021). Conforme ilustrado na Figura 2, na operação com reversão do sentido de escoamento do ar são formadas duas frentes de secagem (retratadas em azul), uma ascendente e outra descendente, deslocando a região de maior umidade para a porção central do leito.

Figura 2 – Ilustração do leito fixo, com e sem reversão.



Fonte: Genaro, 2021.

2.4.3 Secagem em Camada Fina

A análise da secagem em camada fina é comumente utilizada para compreender a influência de variáveis de operação, como a velocidade do ar de alimentação do leito e sua temperatura, além do comportamento cinético do material ao longo da secagem (BUCKLIN et al., 2013).

O estudo da camada fina despreza gradientes axiais de temperatura e umidade em função da pequena espessura do volume de controle considerado. É definida quando um volume de controle não apresenta gradientes axiais significativos de temperatura e de umidade, o que na prática equivale a uma situação em que não há diferença mensurável entre as temperaturas de alimentação e de exaustão, sendo essa diferença, então, dentro do erro associado à medida (GENARO, 2021).

Para melhor compreender os mecanismos de secagem, é possível relacioná-

los com a cinética de secagem. Trata-se de uma informação fundamental para o dimensionamento de secadores. Tais relações são discutidas nos trabalhos de Sherwood (1929a; 1929b; 1930) e Lewis (1921). Sherwood menciona três mecanismos para explicar o processo de remoção da água do interior de um sólido até sua superfície e de sua transferência para o ar de secagem, sendo que mais de um deles pode ocorrer durante a secagem. Os mecanismos são:

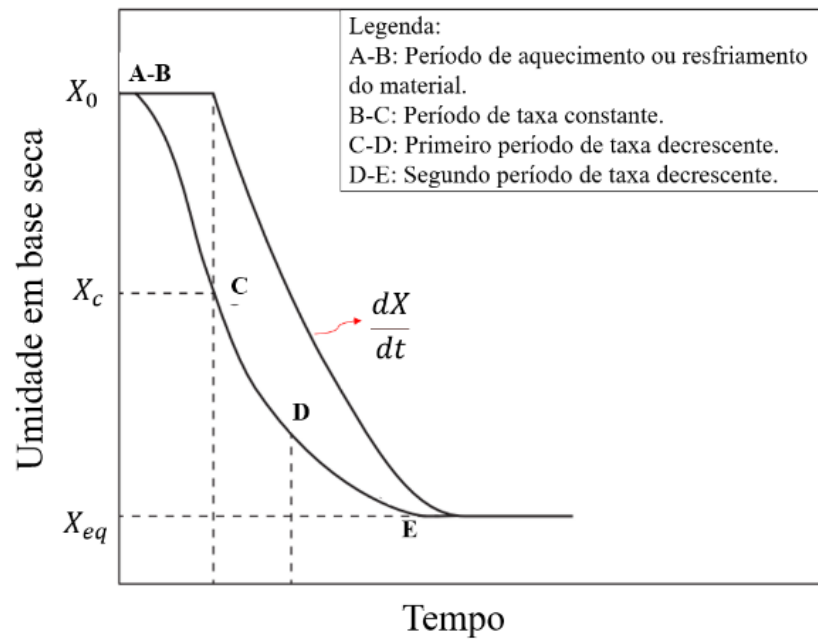
1. Evaporação do líquido na superfície do sólido. Quando a resistência interna à difusão do líquido é pequena comparada à resistência para remoção do vapor na superfície.
2. Evaporação na superfície do sólido. Quando a resistência à difusão do líquido intrapartícula é maior comparada com a resistência para a remoção do vapor da superfície.
3. Evaporação no interior do sólido. Quando a resistência à difusão interna do líquido é maior quando comparada com a resistência total para a remoção do vapor.

Para ilustrar os mecanismos acima citados, analisar as Figuras 3 e 4 se mostra útil. É possível notar que no começo do processo a taxa de secagem é constante (B-C), pois nesta etapa a superfície do sólido está molhada com líquido e a taxa de evaporação não é função da quantidade de água no sólido. Essa etapa representa o item 1. Conforme o processo ocorre, a secagem passa a ter taxa decrescente e, ou o mecanismo do item 2, no caso de acontecer evaporação na superfície do sólido (C-D) e a diminuição da umidade na superfície do sólido controlar o processo, ou o descrito no item 3, se a evaporação ocorrer no interior do sólido (D-E) e a diminuição da umidade no interior dele controlar o processo, prevalecem. Há também casos em que ocorre tanto a evaporação na superfície do sólido quanto em seu interior, uma após a outra.

Existem dois estágios de taxa de secagem decrescente, a primeira quando a diminuição da umidade na superfície do sólido predomina e a segunda quando a diminuição da umidade no interior dele controla o processo. Em grãos a secagem não costuma apresentar o período de taxa constante, apenas o período de taxa decrescente de secagem difusiva.

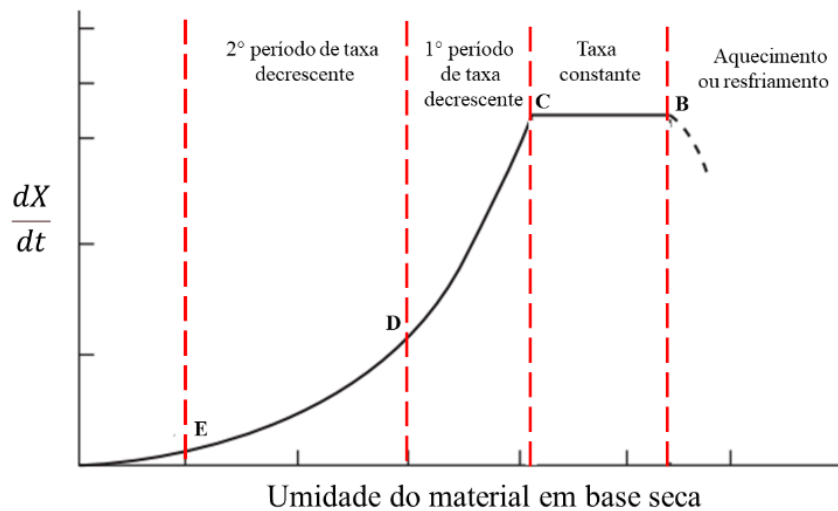
Na Figura 3, X_c é a umidade crítica do material e caracteriza a passagem da etapa de taxa constante de secagem para a decrescente (GENARO, 2021).

Figura 3 – Esquematização de uma curva de secagem.



Fonte: Genaro, 2021.

Figura 4 – Gráfico da taxa de secagem em função da umidade do material.



Fonte: Genaro, 2021.

Neste trabalho, a análise em camada fina foi feita para definir uma descrição

matemática apropriada para a cinética de secagem.

2.4.4 Secagem em Camada Espessa

Na secagem em camada espessa, ao contrário da secagem em camada fina, os gradientes de umidade e temperatura são significativos. Modelos de secagem em camada espessa são empregados no estudo da previsão do comportamento de secadores, assim como na simulação, otimização, controle e projetos (GENARO, 2021).

Diferentes autores utilizaram diferentes equações para modelar tanto secadores com reversão quanto sem. Os modelos diferem na quantidade de parâmetros considerados e na implementação em código dos algoritmos empregados para resolução do sistema de equações do modelo. Outro fator que difere modelos de secagem em camada espessa é se são teóricos, empíricos ou híbridos.

A escolha do modelo deve levar em consideração a precisão desejada e a finalidade do processo de secagem. Modelos de secagem em camada espessa podem ser encontrados na sessão de revisão bibliográfica em Genaro (2021).

2.5 MODELO DE DUAS FASES DE MASSARANI E TELLES

Neste trabalho, o modelo de duas fases de Massarani e Telles foi empregado, que tem como premissa que em cada posição axial as duas fases do sistema, fluida e sólida, compostas por ar de secagem com vapor d'água e matriz seca com água líquida, respectivamente, são meios contínuos em contato no secador e têm sua temperatura, umidade e velocidade, contínuas.

O modelo de duas fases de Massarani e Telles (MASSARANI e TELLES, 1992; CENKOWSKI et al., 1993; PRADO e SARTORI, 2011) considera na modelagem fenômenos difusivos, dispersivos e convectivos em se tratando de transferência de massa e o fenômeno da condução no caso da transferência de calor, assim como equações de conservação de quantidade de movimento, as isotermas de secagem e equações constitutivas para ambas as fases.

Para o equacionamento do modelo, foram feitas as seguintes considerações:

- escoamento unidirecional do ar de secagem;
- Gradientes de pressão desprezíveis;
- Comportamento ideal da fase fluida;
- Transporte convectivo de massa e calor entre fases;
- Transferência de calor pelas paredes do secador é desprezível;
- Temperatura, umidade e velocidade do ar são uniformes na seção de entrada;
- Não há interação de movimento entre as fases.

2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA

A partir das considerações feitas no modelo proposto por Massarani e Silva Telles (1992), são obtidos os balanços de massa apresentados a seguir. Para a fase sólida o balanço de massa é dado por:

$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = \frac{-f}{(1 - \varepsilon)\rho_s} \quad (1)$$

onde X é a umidade da alumina em base seca, ε a porosidade, z a coordenada da direção de escoamento do ar, t representa o tempo, f a transferência de massa entre as fases e ρ_s a densidade da fase sólida. Já o balanço de massa da fase fluida é calculado por:

$$\frac{\partial Y(z, t)}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon \rho_f} \left(f - G_f \frac{\partial Y(z, t)}{\partial z} \right) \quad (2)$$

em que Y representa a umidade absoluta do ar, ρ_f a densidade da fase fluida e G_f seu fluxo mássico. O balanço de energia da fase sólida é obtido pela Equação 3, conforme segue.

$$\frac{\partial T_s(z, t)}{\partial t} = \frac{ha[T_f(z, t) - T_s(z, t)] - \lambda f}{(1 - \varepsilon)\rho_s C p_s} \quad (3)$$

sendo T_s a temperatura da fase s3lida, T_f a temperatura da fase fluida, h o coeficiente de transfer3ncia de calor por convecç3o, a a 3rea superficial do s3lido por unidade de volume 3 representada pela letra a , o calor espec3fico de vaporizaç3o da 3gua por λ e o calor espec3fico da fase s3lida por Cp_s . Para o balanço de energia da fase l3quida foi utilizada a Equaç3o 4, mostrada a seguir.

$$\varepsilon \rho_f C p_f \frac{\partial T_f(z, t)}{\partial t} + \rho_f C p_f \frac{\partial T_f(z, t)}{\partial z} = -ha[T_f(z, t) - T_s(z, t)] - fCp_f [T_f(z, t) - T_s(z, t)] \quad (4)$$

Como 3 complexo medir experimentalmente individualmente as temperaturas do fluido e do s3lido ao longo do eixo axial do leito, n3o foram utilizadas as temperaturas individuais das duas fases, mas sim a temperatura de mistura, como a seguir:

$$T_f(z, t) = T_s(z, t) = T_{mix}(z, t) \quad (5)$$

sendo T_{mix} a temperatura de mistura. A partir dessa consideraç3o, 3 poss3vel substituir as Equaç3es 3 e 4 por apenas uma equaç3o que considera a mistura entre as duas fases, sendo ela:

$$\frac{\partial T_{mix}(z, t)}{\partial t} = \frac{-\lambda f - G_f [Cp_f + Y(z, t)Cp_v] \frac{\partial T_{mix}(z, t)}{\partial z}}{(1 - \varepsilon)\rho_s [Cp_s + X(z, t)Cp_l] + \varepsilon \rho_f [Cp_f + Y(z, t)Cp_v]} \quad (6)$$

onde Cp_v representa o calor espec3fico da fase vapor e Cp_l o da fase l3quida. Para a resoluç3o do sistema de equaç3es foram utilizadas as seguintes condiç3es iniciais e de contorno:

$$X(z, 0) = X_0 \quad (7)$$

$$Y(t, 0) = Y_0 \quad (8)$$

$$T_{mix}(z, 0) = T_{m0} \quad (9)$$

$$T_{mix}(0, t > 0) = T_0 \quad (10)$$

sendo X_0 a umidade inicial da fase sólida em base seca, Y_0 a umidade absoluta do ar de secagem, T_{m0} a temperatura inicial da mistura entre as fases no leito e T_0 a temperatura de alimentação do ar de secagem. Para o cálculo da taxa de secagem foi utilizada a seguinte equação:

$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = -k(X - X_{eq}) \quad (11)$$

em que X_{eq} é a umidade de equilíbrio e k é a constante de secagem, calculada usando a equação do tipo de Arrhenius a seguir:

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-Ea}{R} \frac{1}{(T_{mix}(z,t) + 273,15)}\right) \quad (12)$$

Os parâmetros k_0 e $-Ea/R$ foram determinados a partir da linearização da Equação 12, fazendo usufruto de dados experimentais de secagem de alumina em camada fina.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentadas algumas propriedades da alumina, assim como a caracterização do leito de secagem, o modelo e os *softwares* utilizados para as simulações, incluindo parâmetros e variáveis dela.

3.1 MATERIAIS

Na simulação foram usadas esferas de alumina com diâmetro 3,2 mm. No Quadro 1 é possível encontrar propriedades físicas da alumina encontradas na literatura.

Quadro 1 – Propriedades físicas da alumina.

Referência	Propriedade
Calçada <i>et al.</i> (1994)	Massa específica da alumina [kg m^{-3}]: $\rho_s=1690$
Perazzini (2014)	Área específica [$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$]: 294,81
Perazzini (2014)	Volume específico dos poros da partícula [$\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$]: 0,40
Perazzini (2014)	Diâmetro médio dos poros da partícula [nm]: 5,43
Perazzini (2014)	Condutividade térmica efetiva na estagnação [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]: $k_{ef}=4,6 \pm 0,14$
Calçada <i>et al.</i> (1994)	Calor específico da partícula em função da temperatura (T_s): $C_{p_s}=41,04 (22,08+8,97 \cdot 10^{-3} T_s-5,23 \cdot 10^{-5} T_s^2)$

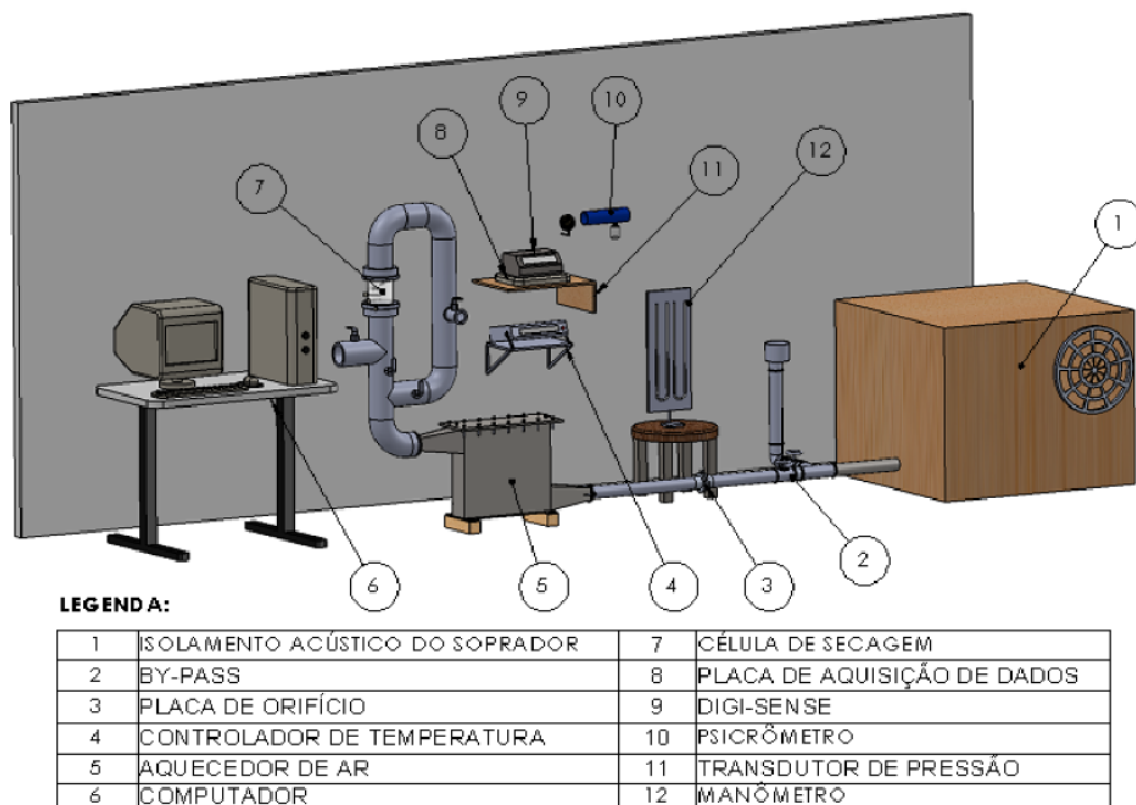
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 MÓDULO DE SECAGEM

O sistema de secagem simulado baseia-se no módulo experimental da Figura 5, utilizado por Genaro (2021). O sistema é composto por um aquecedor de ar, um conjunto de tubulações, um soprador, válvulas - as quais servem para determinar o sentido de escoamento do ar de secagem - e uma célula de secagem, um leito fixo de 10 cm de altura e 10 cm de diâmetro preenchido com as esferas de alumina de 3,2 mm de diâmetro.

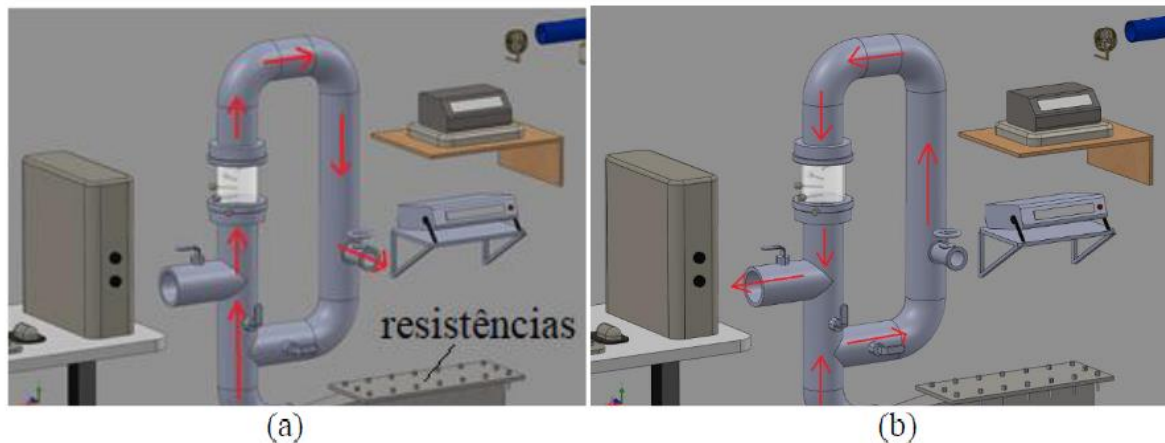
A Figura 6 ilustra como o sistema de válvulas é capaz de inverter o sentido de escoamento do ar de secagem entre os sentidos (a) ascendente e (b) descendente, conforme apontado pelas setas.

Figura 5 – Esquemática do módulo de secagem usado nas simulações.



Fonte: Genaro, 2021.

Figura 6 – Esquemática do funcionamento do sistema de válvulas para gerar escoamento (a) ascendente e (b) descendente.



Fonte: Genaro, 2021.

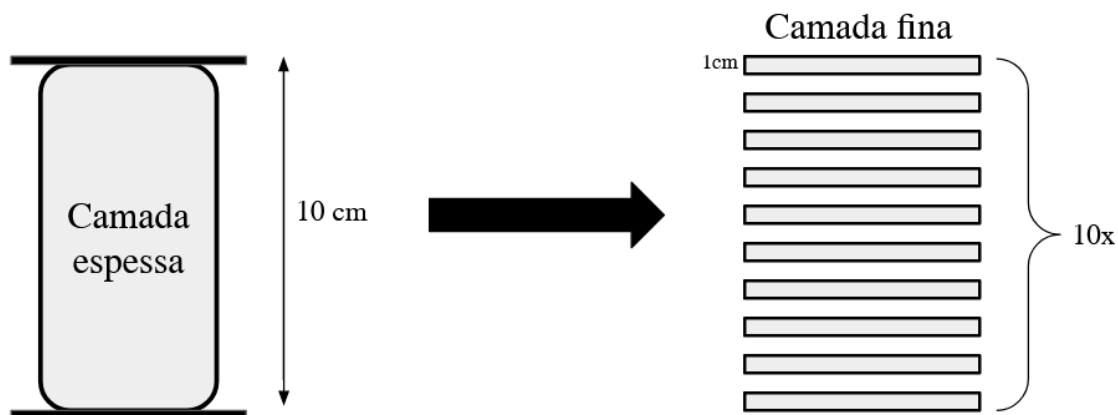
3.3 MODELO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

O modelo escolhido para realizar as simulações foi o proposto por Massarani e Telles (1992). A simulação foi feita utilizando Scilab e Python e seus resultados foram comparados com os da mesma simulação feita em Matlab. Como é um *software* pago, a simulação em Matlab não foi feita neste trabalho. Os dados da simulação foram fornecidos pelo Prof. Dr. Fábio Bentes Freire e utilizados tanto na comparação de resultados quanto para traçar um gráfico deles.

3.4 PARÂMETROS E SIMULAÇÃO

Foram utilizados tanto Scilab quanto Python nas simulações, admitindo que o leito fixo espesso, que possui 10 cm de altura, equivale a dez leitos fixos finos de 1 cm de altura cada, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Esquematização da separação de um leito de 10 cm em dez leitos de 1 cm cada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na simulação é assumido que não há gradientes significativos de temperatura e de umidade nos leitos de 1 cm, o que permite que sejam considerados pequenos tanques de mistura perfeita, de modo que o leito de 10 cm equivale a dez leitos de 1 cm em série.

O Scilab, em sua função denominada *ode*, útil para resolução de equações diferenciais, admite como argumento opcional, um parâmetro que especifica o *solver*, o método a ser empregado para resolver o sistema de equações. O *solver* padrão busca resolver as equações diferenciais usando métodos não adequados para equações rígidas, que a modelagem neste trabalho apresenta. Caso o Scilab detecte que um método indicado para resolver equações rígidas deve ser usado, ele muda o *solver* automaticamente. Alternativamente, é possível explicitar o *solver* a ser usado, o que foi feito na simulação deste trabalho.

A biblioteca Python chamada Scipy também possui uma função que permite a resolução do sistema de equações que descreve o problema, denominada *solve_ivp*. Essa função, assim como a função *ode* do Scilab, permite que se especifique o *solver* a ser empregado. Nas simulações em Python o *solver* escolhido foi o Radau, apropriado para a resolução de equações rígidas.

Para solucionar o sistema de equações que descreve o problema, o modelo

matemático foi discretizado na coordenada axial e foi feita a integração de cada camada fina ao longo do tempo de secagem.

Os valores de operação utilizados nas simulações estão apresentados no Quadro 2. A simulação foi realizada analisando a cada 0,33 minutos tanto a temperatura quanto a umidade em três pontos do leito de 10 cm de altura. Os pontos escolhidos foram em $z = 1$ cm, $z = 5$ cm, e $z = 10$ cm, até que fosse atingido o equilíbrio para as condições operacionais.

Quadro 2 – Valores de operação utilizados nas simulações.

Temperatura do ar de alimentação ascendente	60°C
Temperatura do ar de alimentação descendente	60°C
Vazão mássica do ar	0,390 kg/min
Umidade inicial do ar (base seca)	0,016
Teor de umidade inicial da alumina (base seca)	0,45
Temperatura inicial do leito	20,8°C

Fonte: Elaborado pelo autor.

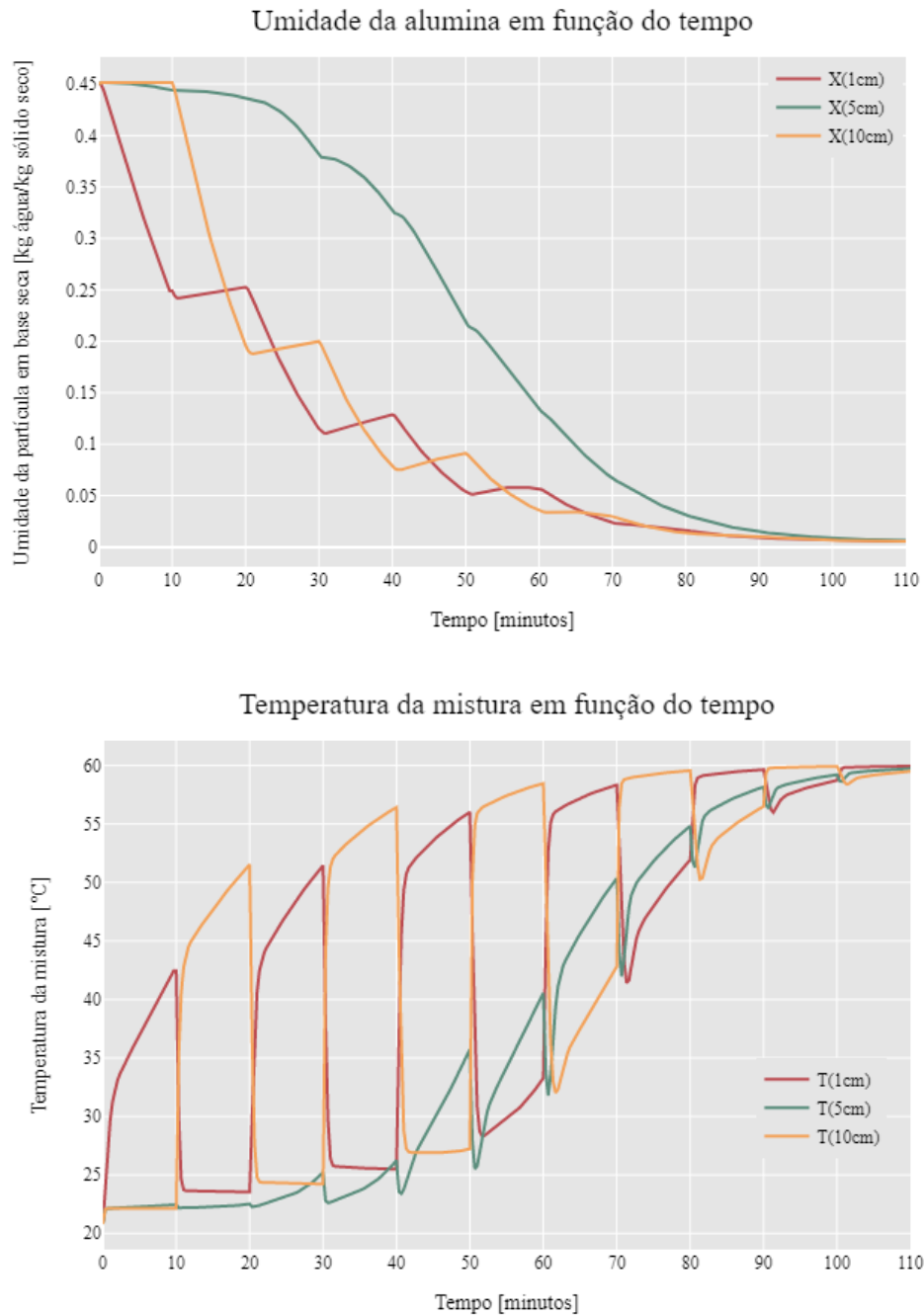
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações mostraram que, de fato, a função ode do Scilab detecta se o problema a ser resolvido possui equações rígidas ou não e altera o *solver* caso tenha. Isso foi descoberto executando o programa três vezes, a primeira sem especificar o argumento opcional que seleciona o *solver*, a segunda especificando que o *solver* a ser utilizado é o chamado stiff, recomendado para a resolução de equações rígidas, a terceira especificando que o *solver* a ser usado seria o denominado adams, que é o escolhido inicialmente se não se explicita qual *solver* deve ser empregado. A terceira execução não foi bem sucedida, o sistema de equações não foi solucionado. O resultado das duas primeiras execuções, contudo, foi o mesmo, o que mostra que de fato o Scilab altera o *solver* de acordo com o problema a ser resolvido quando não é especificado um *solver* na função ode.

Além disso, é possível notar que os resultados das simulações utilizando Matlab, Scilab e Python são bastante coincidentes, como é possível observar nas Figuras 8, 9 e 10, indicando que as três linguagens de programação são capazes de realizar a simulação com sucesso. As diferenças obtidas podem ser justificadas pela diferença entre as implementações do método de Runge Kutta utilizado para solucionar o sistema de equações que descreve a secagem da alumina em leito fixo com reversão do sentido de escoamento do ar de secagem.

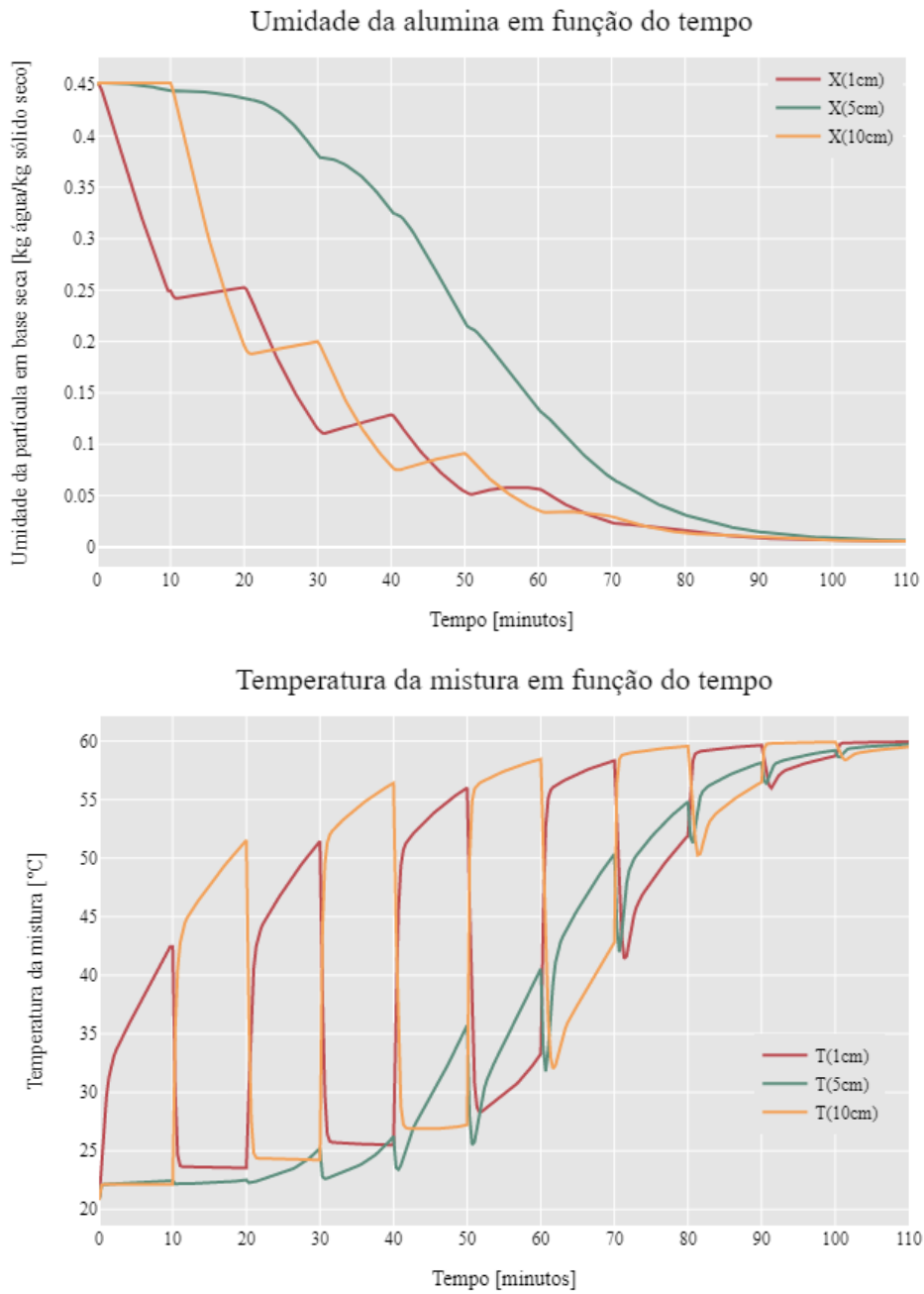
Nos Quadros 3, 4 e 5 são apresentados resumos das diferenças percentuais entre os resultados obtidos nas simulações.

Figura 8 – Gráficos dos resultados da simulação da secagem com inversão do sentido de escoamento do ar de secagem em Matlab.



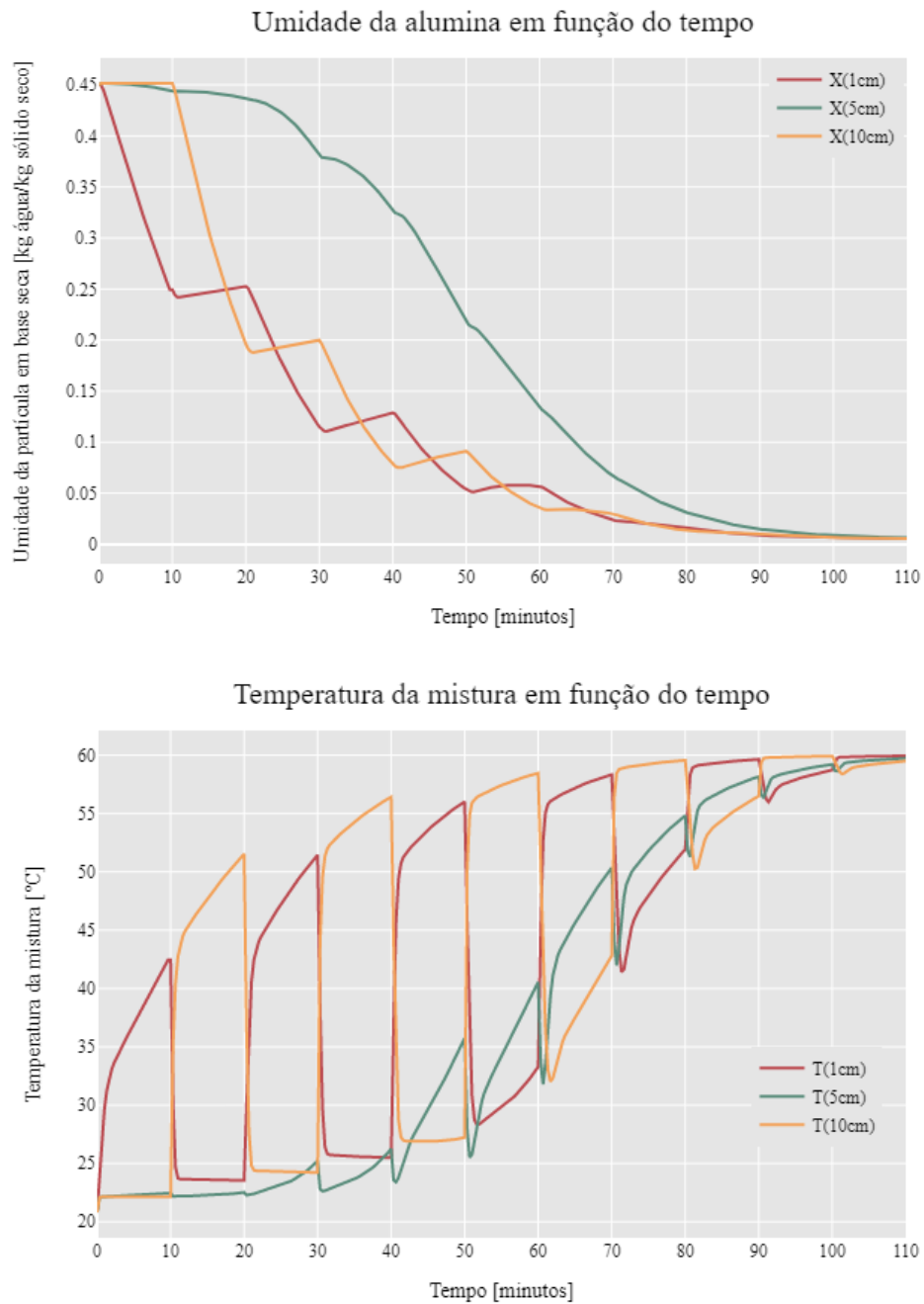
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9 – Gráficos dos resultados da simulação da secagem com inversão do sentido de escoamento do ar de secagem em Scilab.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – Gráficos dos resultados da simulação da secagem com inversão do sentido de escoamento do ar de secagem em Python.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 3 – Resumo das diferenças percentuais entre as simulações em Python e Scilab.

	Diferença % máxima	Diferença % média	Mediana da diferença %
X(1cm)	8,69E-04	1,06E-04	3,57E-05
X(5cm)	7,68E-04	7,37E-05	1,29E-05
X(10cm)	8,24E-04	1,08E-04	3,22E-05
T(1cm)	2,11E-06	6,36E-07	5,47E-07
T(5cm)	2,24E-06	7,10E-07	6,06E-07
T(10cm)	2,22E-06	6,14E-07	5,34E-07

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4 – Resumo das diferenças percentuais entre as simulações em Python e Matlab.

	Diferença % máxima	Diferença % média	Mediana da diferença %
X(1cm)	2,08E-02	7,80E-03	6,08E-03
X(5cm)	3,07E-02	9,06E-03	3,71E-03
X(10cm)	2,45E-02	8,95E-03	7,86E-03
T(1cm)	3,14E-02	2,73E-03	6,13E-04
T(5cm)	2,91E-02	3,02E-03	1,31E-03
T(10cm)	2,96E-02	2,47E-03	4,31E-04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5 – Resumo das diferenças percentuais entre as simulações em Scilab e Matlab.

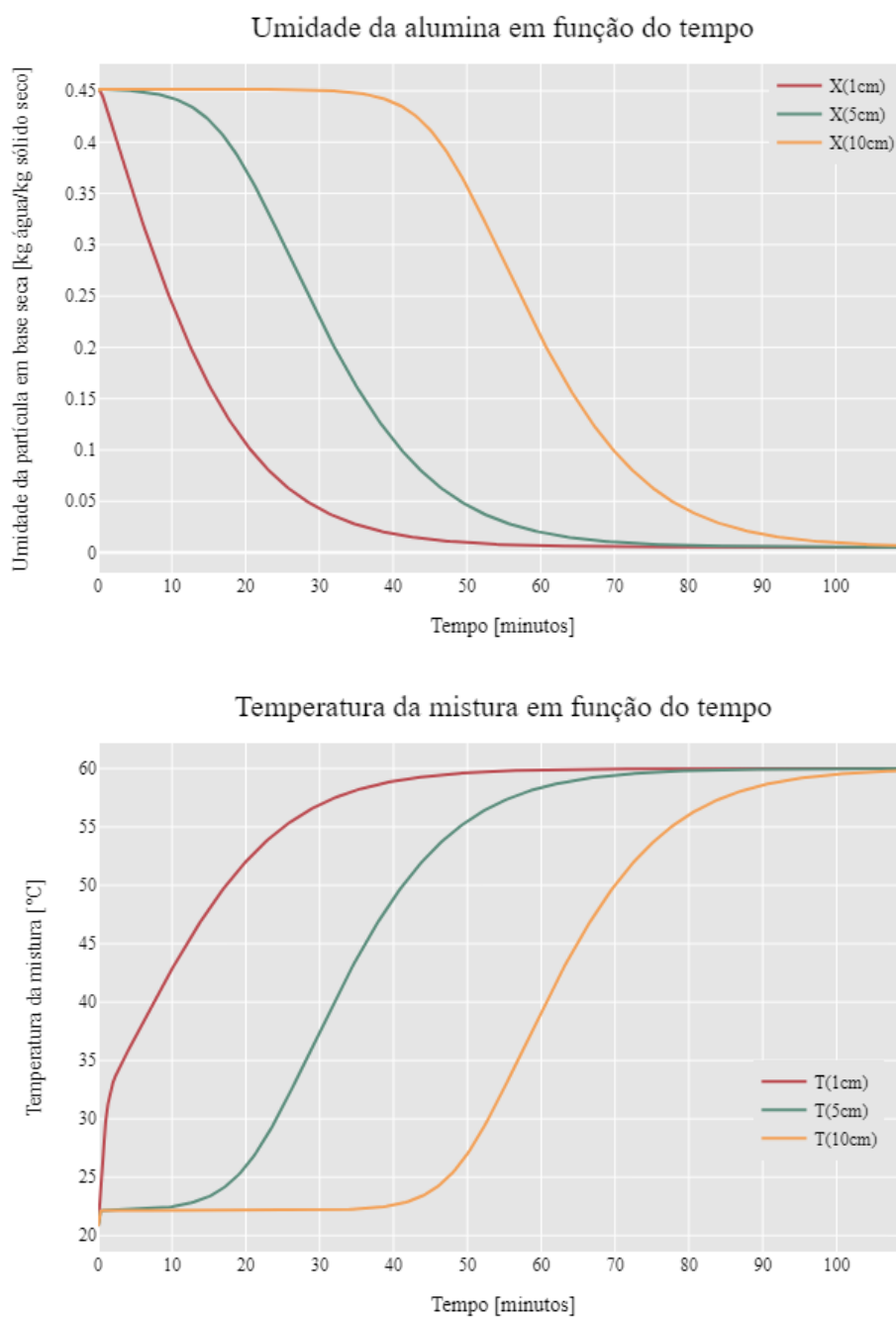
	Diferença % máxima	Diferença % média	Mediana da diferença %
X(1cm)	2,08E-02	7,80E-03	6,08E-03
X(5cm)	3,11E-02	9,07E-03	3,71E-03
X(10cm)	2,41E-02	8,94E-03	7,77E-03
T(1cm)	3,14E-02	2,73E-03	6,13E-04
T(5cm)	2,91E-02	3,02E-03	1,31E-03
T(10cm)	2,96E-02	2,47E-03	4,31E-04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, foi possível notar que a combinação entre linguagens de programação que gerou resultados mais similares foi Python/Scilab. As diferenças entre os valores obtidos pelas combinações Python/Matlab e Scilab/Matlab são semelhantes entre si, mas maiores que as obtidas pela combinação Python/Scilab, sendo que as diferenças obtidas podem ser explicadas pela diferença entre as implementações em cada linguagem de programação do algoritmo utilizado para solucionar o sistema de equações que a descreve

Comparando os resultados das simulações com os de uma operação convencional do leito fixo foi possível observar efetivamente a redução dos gradientes de temperatura e de umidade alcançada com a técnica de reversão. A Figura 11 mostra o resultado de uma simulação semelhante à tratada neste trabalho, porém sem inversão do sentido de escoamento do ar de secagem.

Figura 11 – Gráficos dos resultados da simulação da secagem sem inversão do sentido de escoamento do ar de secagem em Matlab.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na comparação com os resultados das simulações mostrados nas Figuras 8, 9 e 10, fica claro que o espaçamento entre as curvas foi maior na operação convencional, indicando que a reversão, de fato, tende a uniformizar melhor o leito. A secagem com reversão através de duas frentes que convergem para a região intermediária do leito reduziu os gradientes de temperatura e umidade, ressaltando-se que foi possível simular perfeitamente essa condição de operação através dos programas gratuitos.

5 CONCLUSÕES

Analisando os resultados das simulações de secagem de alumina em leito fixo com inversão do sentido de escoamento do ar de secagem, foi possível observar que esse modo de operação produz gradientes de temperatura e de umidade menores quando comparados aos formados em uma operação convencional, sem inversão do sentido de escoamento do ar.

Embora os resultados obtidos utilizando Python, Scilab e Matlab tenham sido ligeiramente diferentes, todas essas linguagens podem ser utilizadas satisfatoriamente para simular a secagem da alumina em leito fixo com reversão do sentido de escoamento do ar de secagem. É também válido pontuar que Python apresenta uma vantagem sobre Matlab e Scilab em termos de usabilidade, uma vez que há mais material sobre disponível, assim como mais exemplos de implementação, o que facilita o desenvolvimento do trabalho.

Por fim, o uso de dois programas disponíveis gratuitamente na internet permitiu que fossem feitas análises consistentes sobre a dinâmica da secagem em leito fixo espesso com reversão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBINI, G. **Estudo da Secagem de Grãos em Leito Fixo, com e sem escoamento reversão do ar de secagem**. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2019.

BALA, B. K. **Drying and Storage of Cereal Grains**. Second ed. WILEY Blackwell, 2017.

BARROZO, M. A. S.; HENRIQUE, H. M.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. **The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds**. Journal of Stored Products Research, v. 42, n. 3, p. 348–356, 2006. "Bauxite and Alumina 2021 Annual Publication" (PDF). U.S. Geological Survey. January 2020. Retrieved 2 August 2021.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.H. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450p.

BUCKLIN, R.; THOMPSON, S.; MONTROSS, M.; ABDEL-HADI, A. **Grain Storage Systems Design**. Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering. p.123–175, 2013. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00007-0>.

COMPANY. Scilab, 2022. Disponível em: <https://www.scilab.org/about/company>. Acesso em: 05 de julho de 2022.

HISTORY. Scilab, 2022. Disponível em: <https://www.scilab.org/about/company/history>. Acesso em: 05 de julho de 2022.

HOSSEINPOUR, F.; HAJIHOSSEINI, H. **Importance of simulation in manufacturing**. World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 51, n. 3, p. 292-295, 2009.

MASSARANI, G.; SILVA TELLES, A. **Aspectos da secagem de material sólido particulado**. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. (Eds.). Tópicos especiais em secagem. São Carlos, EDUFSCar, 1992.

MCCABE, W. L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5ª edição. McGraw-Hill, Inc., 1993.

MOURA, R. S. F. D. **Estudo da cinética de secagem de caju (*Anacardium occidentale* L.) em um secador de leito fixo**. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.

ODE. Scilab, 2022. Disponível em: https://help.scilab.org/docs/6.1.1/en_US/ode.html. Acesso em: 01 de setembro de 2022.

PORDAGE, L. J.; LANGRISH, T. A. G. **Stack-wide behavior for hardwood drying**. *Drying Technology*, v. 25, n. 10, p. 1779–1789, 2007.

PYTHON (PROGRAMMING LANGUAGE). Wikipedia, 2022. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Python_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language)). Acesso em: 01 de setembro de 2022.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. **Simulation of packed bed drying of foodstuffs with airflow reversal**. *Journal of Food Engineering*, v. 26, n. 3, p. 259–271, 1995.

SOLVE_IVP. Scipy, 2022. Disponível em: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.integrate.solve_ivp.html#scipy.integrate.solve_ivp. Acesso em: 01 de setembro de 2022.

SOUSA, R.C. **Secagem de materiais pastosos e granulares no leito de jorro mecânico e convencional**. Tese - Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2017a.

TOP COMPUTER LANGUAGES. Statistics Times, 2022. Disponível em:
<https://statisticstimes.com/tech/top-computer-languages.php>. Acesso em: 01 de
setembro de 2022.