



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
ENGENHARIA QUÍMICA**



GABRIELLE MELO DA SILVA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE
CONTROLE NA SECAGEM DE RESINA DE PVC EM LEITO FLUIDIZADO**

Maceió

2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
ENGENHARIA QUÍMICA**



GABRIELLE MELO DA SILVA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE
CONTROLE NA SECAGEM DE RESINA DE PVC EM LEITO FLUIDIZADO**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Química como pré-requisito para conclusão do curso.

Orientador: Professor Dr. Frede de Oliveira Carvalho

Coorientador: Msc. John Henry Percival Brooman

Maceió

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S586m Silva, Gabrielle Melo da.
Modelagem, simulação e avaliação de estratégias de controle na secagem de resina de PVC em leito fluidizado / Gabrielle Melo da Silva. – 2023.
66 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientador: Frede de Oliveira Carvalho.

Co-orientador: John Henry Percival Brooman.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 66.

1. Secadores. 2. Leito fluidizado. 3. Cloreto de polivinila. I. Título.

CDU:678.5

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sua bondade e infinita graça.

Aos meus pais que sempre me apoiaram durante toda a minha graduação.

A minha querida sogra Raquel Saraiva e meu sogro Paulo Saraiva por todo apoio e amor durante esses anos.

Ao meu professor orientador Frede Carvalho, por todos os anos de aprendizado, amizade na vida acadêmica e profissional.

Ao professor Jailson da Universidade Federal de Campina Grande por todo suporte dado para realização do trabalho.

Aos meus colegas de estágio na Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) e da UFAL: Leon, Erick, Vinícuis, Mário, Iury, Thalyta e Morgana. E aos meus supervisores Domingos e Wanderson pelo apoio a aprendizado durante o estágio.

Aos meus colegas de estágio na Braskem: Jedson, Lígia, Samuel, Ananda, Dagoberto, Serafim, Adriana, Pastore, Cristóvão, Joaquim e Andrej.

Aos meus supervisores de estágio Thaylane, John e Raul por todo aprendizado, apoio e carinho.

Ao meu noivo Samuel por todo amor, compreensão, apoio e lealdade durante todos esses anos.

RESUMO

Os secadores de leito fluidizado são equipamentos relevantes na etapa de secagem da resina de PVC. Diante disso, este trabalho descreveu o processo de desenvolvimento da modelagem e simulação de secagem de resina de PVC em leito fluidizado com uma única zona perfeitamente homogênea com adaptação para múltiplas zonas. O processo foi representado por um modelo de dois fluidos. O primeiro é o gás que escoia forçadamente através do leito de partículas fluidizadas sob regime plug-flow. O segundo fluido é a fase particulada tratada como uma mistura globalmente homogênea. O modelo matemático foi baseado nas equações de conservação de massa e energia para os dois fluidos em regime transiente. O modelo foi resolvido numericamente por meio do método do Euler e diferenças finitas, implementado em um código computacional em linguagem *Python*. Foram realizadas várias simulações aplicando perturbações em variáveis do processo com a finalidade de analisar os aspectos dinâmicos do modelo implementados, como por exemplo, a sensibilidade e a velocidade de resposta. As análises dessas respostas dinâmicas, como desejado, apresentaram aderências aos dados operacionais da planta.

Palavras-chave: secador; leito fluidizado; PVC.

ABSTRACT

Fluidized bed dryers are relevant equipment in the drying stage of PVC resin. In light of this, this study described the development process of modeling and simulating the drying process of PVC resin in a fluidized bed with a single perfectly homogeneous zone with adaptation for multiple zones. The process was represented by a two-fluid model. The first fluid is the gas flowing forcibly through the bed of fluidized particles, hypothetically in a plug-flow regime. The second fluid is the particulate phase treated as a globally homogeneous mixture. The mathematical model was based on the conservation equations of mass and energy for the two fluids in transient regime. The model was numerically solved using the Euler method and finite differences, implemented in a computational code in Python language. Several simulations were performed by applying disturbances to process variables in order to analyze the dynamic aspects of the implemented model, such as sensitivity and response speed. The analyses of these dynamic responses, as desired, showed adherence to operational data from the plant.

Keywords: Dryer; Fluidized bed; PVC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Cadeia de produção do PVC.....	5
Figura 2 – Estrutura de copolímeros.	5
Figura 3 – Processo produtivo do PVC.	7
Figura 4 – Diagrama simplificado da área de secagem.....	7
Figura 5 - Micrografia de uma partícula de PVC obtido pelo processo de polimerização em suspensão, cortada de modo a exibir sua estrutura interna e observada através do Microscópio Eletrônico de Varredura.....	9
Figura 6 – Curva ideal de secagem.	11
Figura 7 - Discretização de domínios unidimensionais: (a) semi-infinito, (b) finito.	15
Figura 8 – Metodologia utilizada para realização do trabalho.	17
Figura 9 – Representação do modelo de dois fluidos.	18
Figura 10 - Fluxograma da rota de cálculos.....	32
Figura 11 – Sequência de cálculos para modelagem de secador com múltiplas zonas.	34
Figura 12- Discretização de domínios unidimensionais: (a) semi-infinito, (b) finito. . Erro! Indicador não definido.	
Figura 13 – Planilha em Excel para entrada de dados para realização da simulação	35
Figura 14 – Aba com os resultados das variáveis de output em cada zona.....	36
Figura 15 - Aba com os gráficos dinâmicos.....	36
Figura 16 - Perfis de umidade e temperatura do leito e do gás no tempo considerando o caso de referência.....	38
Figura 17 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor, considerando o caso de referência.....	39
Figura 18 - Perfis de umidade e temperatura do leito e do gás no tempo considerando +10% sobre a carga de PVC.....	40
Figura 19- Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando +10% sobre a carga de PVC.	41
Figura 20 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando -10°C sobre a temperatura de entrada do bolo úmido.	42
Figura 21 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -10°C sobre a temperatura de entrada do bolo úmido.	43
Figura 22- Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo considerando -10°C sobre a temperatura do ar quente.....	44
Figura 23 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -10°C sobre a temperatura do ar quente.....	45
Figura 24 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando -10°C sobre a temperatura da água quente.	46

Figura 25 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -10°C sobre a temperatura da água quente.	47
Figura 26 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando +10% sobre a umidade de alimentação.....	48
Figura 27 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando +10% sobre a umidade de alimentação	49
Figura 28 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando -10% sobre a vazão de ar quente.	50
Figura 29 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -10% sobre a vazão de ar quente.....	51
Figura 30 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando -20% sobre a vazão de água quente.....	52
Figura 31 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -20% sobre a vazão de água quente.	53
Figura 32 – Caso de referência.....	55
Figura 33- Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na carga de PVC.	56
Figura 34 - Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na umidade da alimentação.	57
Figura 35- Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na vazão de ar.....	58
Figura 36 - Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na temperatura do ar.	59
Figura 37- Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na entrada do bolo úmido.	60
Figura 38 - Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na vazão de água quente.....	61
Figura 39 - Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na temperatura da água quente.	62
Figura 40 – Aba com implementação de controle PID.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados obtidos após os distúrbios em degrau aplicados.	53
Tabela 2 – Avaliação da dinâmica do processo.....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

N_{AC}	Fluxo de massa entre a interface da fase gás e particulada para $X=X_C$
N_A	Fluxo de massa entre a interface da fase gás e particulada
T_{G0}	Temperatura de entrada do gás
T_G^N	Temperatura do gás na saída do secador
T_G^i	Temperatura do gás na célula i
T_G^{i-1}	Temperatura do gás na célula anterior ($i-1$)
V^i	Volume na célula i
X_C	Umidade crítica da partícula em base seca
X_S	Umidade da partícula na saída do secador em base seca
X_E	Umidade de equilíbrio da partícula
X_{S0}	Umidade da partícula na entrada do secador
Y_G	Umidade do gás no equilíbrio
Y_G^N	Umidade do gás na saída do secador
a_m	Superfície específica para transferência de massa
k_Y	Coefficiente de transferência de massa entre o volume de gás e a superfície da partícula com base em molar fração em base seca
m^i	Transferência de massa entre a fase gás e partícula
ε_G	Fração volumétrica em fase gasosa em condições operacionais
ε_{Gmin}	Fração volumétrica em fase gasosa em fluidização mínima
λ_{TS}	Calor de vaporização da água na temperatura da partícula
μ_G	Viscosidade da fase gás
μ_W	Viscosidade da água quente
ρ_G	Massa específica da fase gás
ρ_S	Massa específica da fase particulada
ρ_L	Massa específica de água líquida

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVOS GERAL	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA RESINA	3
3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DO PVC	3
3.3 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO PVC	8
3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA	9
3.5 PRINCÍPIOS DA MODELAGEM DA SECAGEM	10
3.6 PID INCREMENTAL	12
3.7 LINGUAGEM <i>PYTHON</i>	13
3.8 QT DESIGNER	14
3.9 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS	15
4. METODOLOGIA	16
4.1. DESENVOLVIMENTO DO MODELO	18
4.1.2. PARÂMETROS DO MODELO	21
4.2. CARACTERÍSTICAS DO SECADOR E CONDIÇÕES DE PROCESSO	27
4.3. SEQUÊNCIA DE CÁLCULOS	28
4.4. ADAPTAÇÃO DO MODELO PARA MÚLTIPLAS ZONAS	33
5. RESULTADOS	35
5.1. FERRAMENTA COM INTERFACE GRÁFICA	35
5.2. SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA UMA ZONA	37
5.3. SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA MÚLTIPLAS ZONAS	54
5.4. CONSTANTE DE TEMPO E GANHO	63
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
6.1 CONCLUSÕES	64
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

Os secadores de leito fluidizado são equipamentos essenciais nos processos da indústria petroquímica, farmacêutica e de alimentos. Na produção de resina de PVC (Policloreto de Vinila), os secadores fazem um papel essencial na etapa de secagem da resina de PVC. No processo, após a reação de polimerização, resulta-se uma mistura contendo 30% de PVC e 70% de água, a qual alimenta as centrífugas onde ocorre a desidratação, resultando em um “bolo úmido” contendo aproximadamente 30% de água. Então, esse “bolo úmido” alimenta os secadores de leito fluidizado para retirar a água residual contida na resina.

A energia necessária para secagem da resina é geralmente fornecida pelo ar quente e água quente circulando internamente através de serpentinas. O ar de fluidização é distribuído em uma proporção fixa por uma placa perfurada, a qual é responsável pela distribuição do ar e fluidização do leito.

Diante disso, no desenvolvimento de estratégias para melhorias seja referente à eficiência energética, como a eficiência econômica de um processo químico industrial, bem como melhorias na qualidade do produto, a modelagem e simulação do mesmo são uma etapa muito importante, pois permite um maior entendimento do processo proporcionando avaliar tanto os novos protocolos operacionais como avaliação e desenvolvimento de novas estratégias de controle.

Tacidelli et al. (2012) traz uma abordagem de uma modelagem fenomenológica de secadores de leito fluidizado em regime dinâmico. Desta forma, para uma avaliação melhor, esse trabalho propôs um modelo matemático que descreveu o processo de secagem para avaliação de estratégias de controle. Sendo possível assim, atingir condições que garantam a estabilidade operacional, e garantir a qualidade do produto.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Geral

O objetivo desse trabalho foi implementar um modelo e realizar um diagnóstico da estratégia de controle atual dos diversos secadores de PVC em leito fluidizado existentes na Braskem, e então criar um sistema configurável em Python para apoiar a simulação desses equipamentos, visando aplicações de melhorias de performance, controle de processo e alterações construtivas.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o processo de secagem, e desenvolver um modelo fenomenológico para o secador de leito fluidizado da PVC1-AL com uma zona completamente homogênea e posteriormente para múltiplas zonas, baseado no balanço de massa e energia;
- Desenvolver a sequência de cálculos necessária para a elaboração do algoritmo;
- Realizar simulações padrão em linguagem *Python*, com cenários de resposta a degrau em carga, umidade da carga, vazão de ar, temperatura do ar, temperatura da água de aquecimento.
- Calcular constante de tempo, ganho e aspectos computacionais (estabilidade, tempo de computação, tempo da simulação);
- Realizar um diagnóstico da estratégia de controle atual e elencar melhorias ou modificações para maior eficiência.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica foram abordados os tópicos de Características gerais da resina; Descrição do processo produtivo do PVC; Propriedades e Características Morfológicas do PVC; Modelagem Matemática; Princípios da modelagem da Secagem, PID Incremental, Linguagem Python, Qt Designer e Métodos das Diferenças Finitas.

3.1 Características gerais da resina

O PVC contém, em peso, 57% de cloro, obtido através da eletrólise do sal marinho (um recurso natural inesgotável) e 43% de eteno, derivado do petróleo. A eletrólise é a reação química resultante da passagem de uma corrente elétrica por água salgada (salmoura).

Para a obtenção do eteno, que representa apenas 43% desta resina, o óleo cru passa por uma destilação na qual é obtida a nafta leve. O eteno é gerado a partir do processo de craqueamento catalítico (quebra de moléculas grandes em moléculas menores com a ação de catalisadores para aceleração do processo) da nafta. Tanto o cloro como o eteno estão na fase gasosa e da reação dos dois é produzido o DCE (dicloroetano). A partir do DCE, obtém-se o MVC (monômero cloreto de vinila).

As moléculas de MVC são submetidas ao processo de polimerização, ou seja, elas se ligam formando uma molécula muito maior (polímero), conhecida como PVC (policloreto de vinila), que é um pó muito fino, de cor branca e totalmente inerte (Tecnologia do PVC - Braskem, 2006). O PVC é considerado inócuo, inativo e seguro, e apresenta características que o tornam altamente manuseável e aplicável devido à sua leveza ($1,4 \text{ g/cm}^3$). É resiliente à ação de fungos, bactérias, insetos e roedores, além de resistir à maioria dos reagentes químicos. Destaca-se como isolante térmico, elétrico e acústico, sendo sólido e robusto contra impactos. Além disso, é impermeável a gases e líquidos, suporta as intempéries (sol, chuva, vento e maresia) e possui uma longa durabilidade, superando os 50 anos em construções. Com a capacidade de autoextinção, não propaga chamas, sendo uma opção versátil e ecologicamente responsável. Totalmente reciclável, sua fabricação é realizada com baixo consumo de energia (Junior; Nunes; Ormanji, 2006)

3.2 Descrição do processo produtivo do PVC

Polímeros, termo derivado do grego "poly" (muitas) e "meros" (partes), são materiais de origem natural, artificial (modificações de polímeros naturais) ou sintética, com natureza

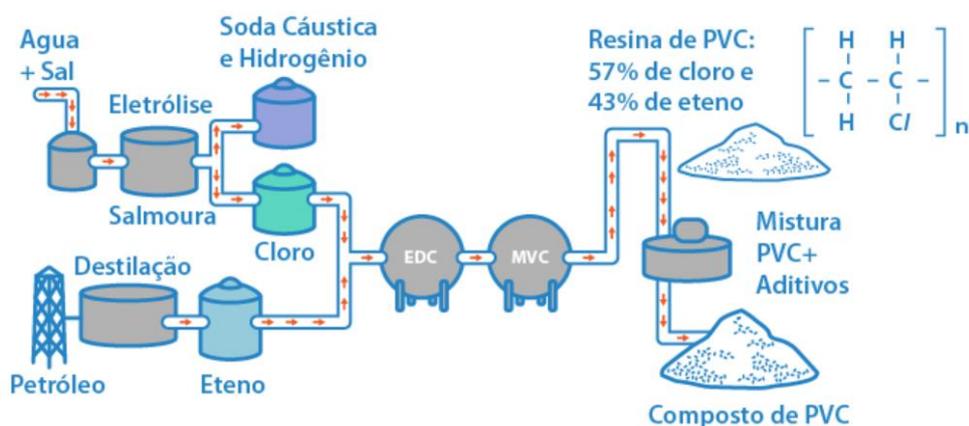
orgânica ou inorgânica. Essas substâncias são compostas por numerosas macromoléculas, sendo que cada uma delas apresenta uma estrutura interna caracterizada pela repetição de pequenas unidades, denominadas "meros"(Silva *et al*, 2013).

Os monômeros desempenham um papel crucial como os componentes fundamentais para a síntese dos polímeros. Essas moléculas simples, pelo menos bifuncionais, têm a capacidade de reagir em ambas as extremidades. Em condições apropriadas, essa reação origina a unidade de repetição (mero), que por sua vez constitui as extensas cadeias poliméricas formadoras do polímero. No caso específico da polimerização do policloreto de vinila (PVC), o monômero utilizado é o cloreto de vinila, sendo essa a origem da sigla MVC. No que se refere à aplicação final, os polímeros podem ser classificados em plásticos, fibras poliméricas, borrachas (ou elastômeros), espumas, tintas e adesivos (Silva *et al*, 2013).

O MVC é um gás incolor, inflamável e explosivo com uma pressão de vapor de 2530 mmHg a 20°C, e um ponto de ebulição de -13,4°C. Ele é pouco solúvel em água (1,1 g/L a 28°C) altamente solúvel em gorduras e solventes orgânicos (Silva *et al*, 2013).

A fabricação do PVC ocorre através de duas principais abordagens: a rota do eteno/cloro, também conhecida como processo balanceado, visto que é a mais amplamente adotada em escala global; e a rota do acetileno, que desempenhou um papel significativo até meados da década de 1960, especialmente na Europa Ocidental. Embora a rota do acetileno apresente a vantagem de um menor custo inicial para a instalação da planta de produção, o preço do acetileno derivado do petróleo é superior ao do eteno, tornando essa abordagem economicamente menos viável. No entanto, ela permanece como uma alternativa devido à capacidade de obter acetileno a partir de outras matérias-primas (Junior; Nunes; Ormanji, 2006). A Figura 1 abaixo mostra a rota do eteno/cloro, a qual é a mais utilizada como citado anteriormente.

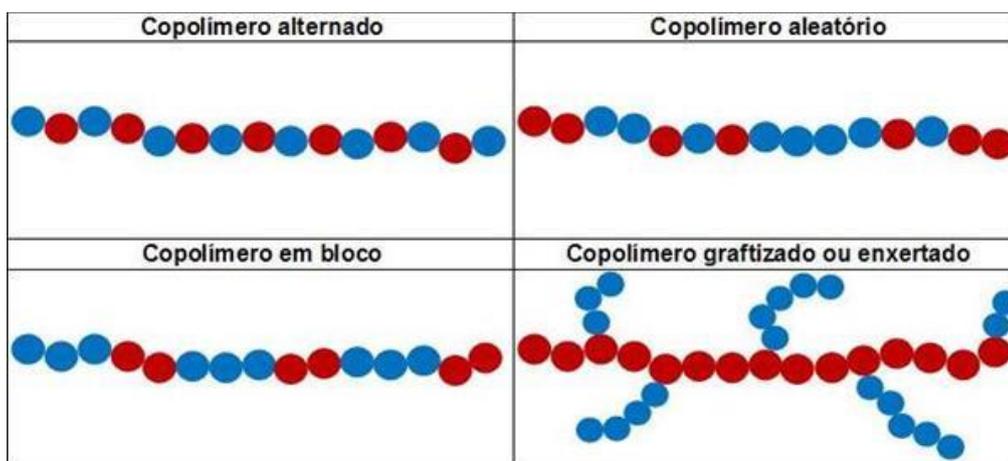
Figura 1- Cadeia de produção do PVC.



Fonte: Instituto Brasileiro do PVC (2023)

Na produção em larga escala do PVC, três processos principais são empregados: polimerização em suspensão (que inclui microsuspenção), emulsão e em massa. Além disso, o processo de polimerização em solução é utilizado, embora de forma bastante restrita para o PVC. Este último método é predominantemente empregado na fabricação de certos copolímeros vinílicos, especialmente destinados a tintas e vernizes. Os copolímeros têm suas macromoléculas formadas pela repetição de dois ou mais tipos de meros. Quanto à formação das macromoléculas, os copolímeros podem ser subdivididos em aleatórios (randômicos ou aleatórios), alternados, em bloco e enxertados (ou graftizados) conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Estrutura de copolímeros.



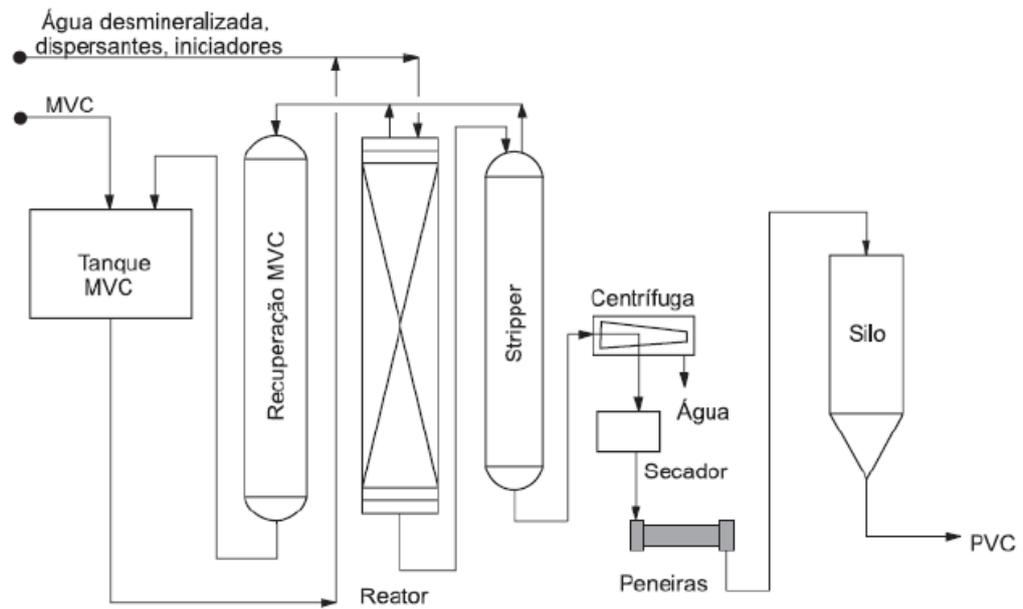
Fonte: Platsbrinq (2023)

Durante o processo de polimerização em suspensão, o PVC é disperso na forma de gotas com diâmetro variando entre 50 e 250 μm . Isso ocorre em meio a uma fase aquosa contínua, impulsionado por agitação vigorosa e na presença de um colóide protetor, também conhecido como dispersante ou agente de suspensão. Utiliza-se um iniciador solúvel no monômero, permitindo que a reação de polimerização se desenrole dentro das gotas em suspensão, por meio de um mecanismo de reações em cadeia via radicais (Junior; Nunes; Ormanji, 2006).

O carregamento dos reatores neste processo começa com água desmineralizada, aditivos, dispersantes em forma de solução e iniciadores (para acelerar a reação, porém não recuperados ao final). Os reatores são, então, selados, e um vácuo é aplicado para remover o oxigênio do meio reacional, pois efeitos adversos podem ocorrer durante a polimerização, afetando o tempo de reação e as propriedades do produto final. Após o vácuo no reator, o MVC liquefeito é introduzido, e a camisa do reator é aquecida com vapor sob pressão para iniciar a reação. Uma vez iniciada, o reator é resfriado, já que a reação é exotérmica e libera uma grande quantidade de energia.

Quando a conversão da reação atinge a faixa de 75 a 95%, a reação é interrompida, e o monômero remanescente é recuperado. O polímero resultante, na forma de lama (suspensão), passa por um processo de *stripping*. Nesse estágio, o MVC remanescente é extraído por meio de vácuo e aumento de temperatura, seja em reatores convencionais ou em torres, onde a lama é tratada com vapor d'água em contracorrente. A lama, então, passa por um processo de concentração via centrifugação, e o material úmido resultante é seco em secadores de leito fluidizado. A resina seca é peneirada para reter partículas extremamente grosseiras e armazenada em silos para posterior acondicionamento em diferentes sistemas de distribuição, como sacos de 25 kg, grandes sacos de 1,2 t ou mais, e até mesmo caminhões-silo. A Figura 3 abaixo mostra em resumo o processo produtivo do PVC (Silva *et al.*, 2013).

Figura 3 – Processo produtivo do PVC.

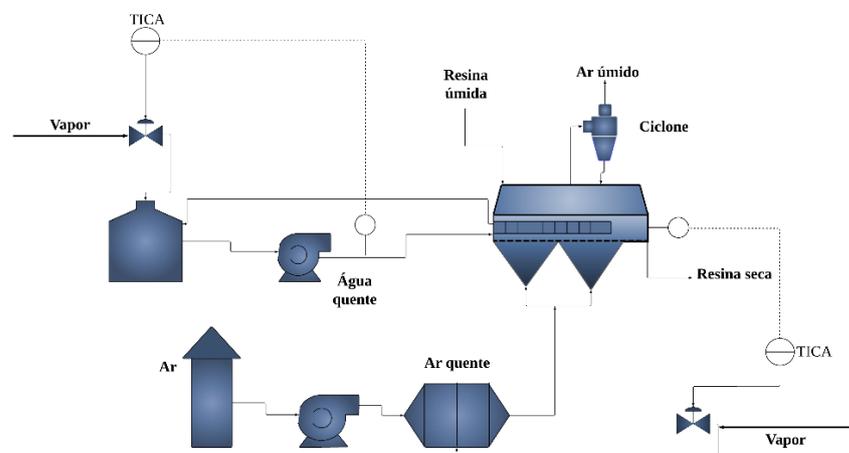


Fonte: Silva *et al* (2013)

A Unidade da PVC1 Alagoas possui capacidade teórica de produção de 274.400 toneladas por ano. Esta capacidade é calculada com base na capacidade máxima de produção dos reatores (máximo possível de bateladas por dia, com a produtividade máxima, em toneladas por dia), operando 365 dias por ano, sem qualquer tipo de restrição.

Este trabalho se concentrou na área de secagem conforme mostrado na Figura 4, na qual estão localizados os secadores de leito fluidizado, os quais são o foco deste trabalho.

Figura 4 – Diagrama simplificado da área de secagem.



Fonte: Autora (2023)

3.3 Propriedades e Características Morfológicas do PVC

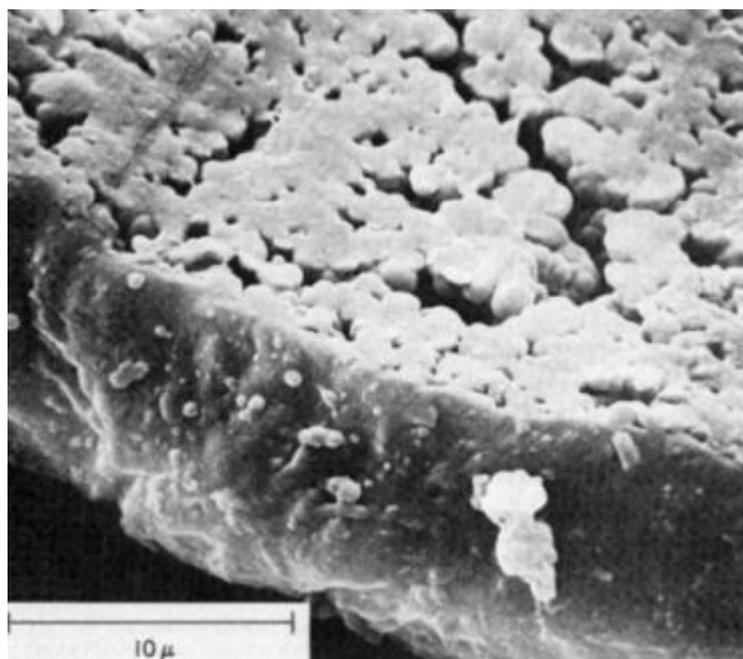
As principais propriedades do PVC incluem a densidade aparente, a porosidade e a granulometria, que serão detalhadas a seguir (Junior; Nunes; Ormanji, 2006):

- **Densidade Aparente (BD - Bulk density):** A densidade aparente de qualquer material em forma de pó representa a relação entre a massa e o volume desse material no estado não compactado. Essa propriedade desempenha um papel crucial na especificação da quantidade de resina que pode ser acomodada em um determinado volume e é influenciada por parâmetros morfológicos, como tamanho e distribuição de partículas, porosidade, formato e rugosidade superficial das partículas. A densidade aparente das resinas de PVC comerciais normalmente varia entre 0,45 g/cm³ (para resinas porosas utilizadas em aplicações flexíveis) e 0,60 g/cm³ (para resinas destinadas a aplicações rígidas transformadas diretamente a partir do pó).
- **Porosidade:** A porosidade é definida como a razão entre o volume de vazios de um meio poroso e o volume total desse meio. Existem três tipos de porosidade nas partículas de PVC produzido por polimerização em suspensão: porosidade entre partículas, intrapartícula acessível e intrapartícula inacessível. A porosidade das resinas de PVC é um indicador significativo da facilidade de remoção do MVC não reagido contido nas partículas, bem como da capacidade de absorção de plastificantes. Esses aspectos são cruciais em aplicações de extrusão a sopro (como garrafas e frascos), onde transparência, baixo nível de pontos duros e baixo teor de monômero não reagido são essenciais para acondicionar produtos alimentícios, óleos, cremes vegetais, água mineral, etc.
- **Distribuição de Tamanho das Partículas:** A granulometria, ou análise granulométrica, é o método mais simples para determinar a distribuição de tamanho de partícula, envolvendo o peneiramento da resina em malhas previamente selecionadas. Para obter resultados confiáveis, as peneiras são agitadas intensamente. Devido à possível formação de cargas estáticas nas resinas, uma pequena quantidade de sílica ultrafina é incorporada como dissipador. A quantidade de resina colocada no topo do conjunto de peneiras é crucial para evitar a passagem forçada de partículas grossas ou o impedimento do fluxo normal de material entre as malhas. A análise granulométrica deve ser conduzida com cuidado para evitar esses problemas.

Quanto aos aspectos morfológicos, as resinas de PVC obtidas por polimerização em suspensão consistem em partículas com diâmetros geralmente na faixa de 50 a 200 µm,

apresentando uma estrutura interna bastante complexa. A Figura 5 ilustra uma partícula de PVC, mostrando aberturas em sua membrana que permitem a visualização de sua estrutura interna. Os aglomerados de partículas primárias e os espaços vazios que contribuem para a porosidade da resina são claramente visíveis. Partículas de resina com essa aparência absorvem aditivos de forma mais eficiente durante o processo de preparação do composto, uma vez que o acesso ao interior da partícula é facilitado.

Figura 5 - Micrografia de uma partícula de PVC obtido pelo processo de polimerização em suspensão, cortada de modo a exibir sua estrutura interna e observada através do Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: Tecnologia do PVC - Braskem (2006)

3.4 Modelagem Matemática

O interesse da indústria em técnicas e pacotes computacionais para a modelagem e simulação de processos tem crescido muito nestes últimos anos, influenciado por vários fatores, tais como os fatores econômicos e a necessidade de uma melhor produção química, incluindo análises de segurança e risco, redução da concentração de emissões químicas e reprodutibilidade de produtos químicos de alta qualidade.

À medida que um processo se torna mais complexo, haverá uma maior necessidade de técnicas de análise dos problemas associados com seu projeto e operação. Naturalmente, existem vários modelos matemáticos para o mesmo sistema, cada um ajustado para resolver um

problema particular associado ao sistema, onde o grau de detalhe requerido depende do problema a ser resolvido e da quantidade de dados disponíveis.

Quanto mais rigorosa for a descrição de um processo químico, o conjunto de equações resultantes será maior e mais difícil de tratar. Embora elas possam ser resolvidas, é aconselhável ao analista usar julgamentos de engenharia para reduzir as equações para um conjunto menos complexo que, para propósitos práticos, resultará em soluções dentro da precisão dos dados proporcionados (Secchi, 1995). Os principais elementos básicos da modelagem são:

- Descrição do processo e definição do problema;
- Teoria e aplicação das leis fundamentais;
- Equacionamento;
- Considerações;
- Consistência;
- Solução desejada;
- Matemática e computação;
- Solução e validação.

3.5 Princípios da Modelagem da Secagem

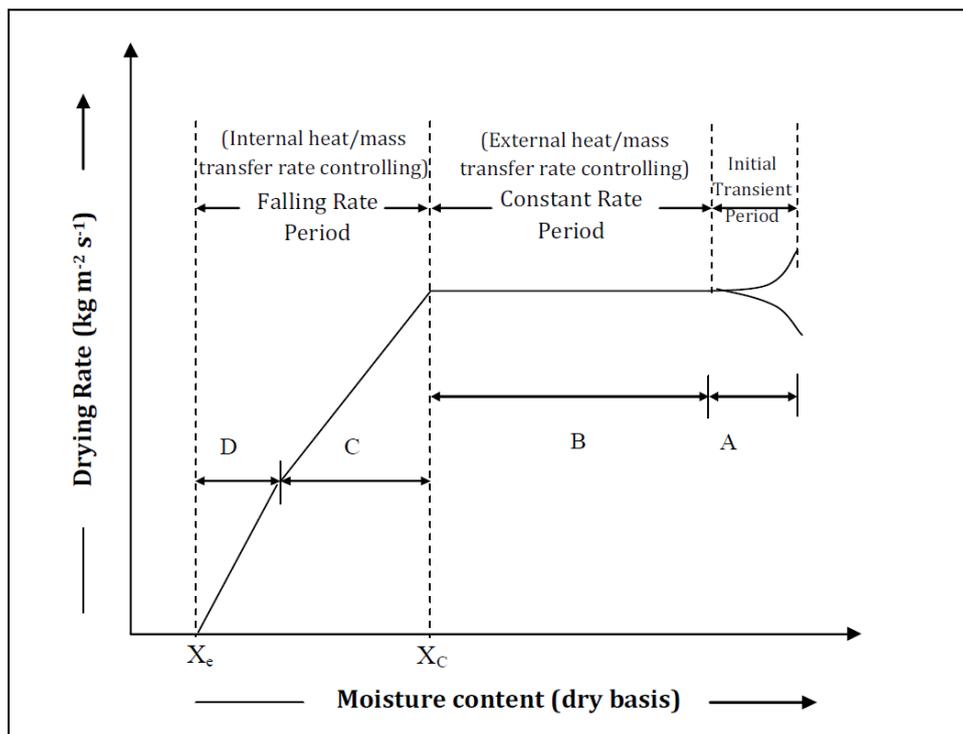
Um leito fluidizado é uma mistura bifásica de material sólido particulado e fluido, amplamente utilizada em diversas tecnologias modernas para a execução eficiente de vários processos físicos e químicos. Eles são empregados em uma variedade de processos industriais, como craqueamento e reforma de hidrocarbonetos, produção de polietileno, calcinação de calcário, combustão de resíduos, preparação de combustível nuclear, secagem, adsorção, resfriamento, aquecimento, congelamento e manuseio de materiais sólidos particulados. Os materiais particulados podem ser de origem natural ou produzidos por processos tecnológicos e podem variar em tamanho e forma. Suas propriedades geométricas, físicas e aerodinâmicas afetam a fluidização e o comportamento do leito fluidizado (Fluidized Bed - THERMOPEDIA, 2010).

No processo de secagem de PVC, considera-se que o grão pode conter umidade em diferentes teores, desde os poros totalmente preenchidos e um filme externo de água até uma resina totalmente seca, passando por diferentes estágios de preenchimento dos poros internos.

No caso da resina de PVC, as etapas de secagem ocorrem como na Figura 6, compreendendo desde uma fase transiente inicial, onde a resina é aquecida até a temperatura do leito, seguida de uma fase de taxa constante, onde o filme externo de água é vaporizado, seguido de uma fase de taxa decadente, onde a superfície da água está cada vez mais distante da superfície do grão e os aspectos internos de difusão e troca térmica através da estrutura do grão são dominantes.

Apesar do PVC ser considerado não-higroscópico, é observada uma umidade limite, denominada umidade de equilíbrio (X_E), que depende da estrutura do grão, da umidade relativa do ar e da temperatura. Outro conceito importante é a umidade crítica (X_C), que corresponde ao fim do período de taxa constante, com o descobrimento dos poros e início da resistência interna à transferência de massa e calor.

Figura 6 – Curva ideal de secagem.



Fonte: Industrial Drying, Principles and Practice – Lecture notes – MUJUMDAR (2011).

Na literatura, é possível encontrar diversos modelos teóricos do processo de secagem, a exemplo disso, Calçada e Massarani (2002) usaram um modelo matemático com base na teoria de fluxo de duas fases de fluidização para prever a secagem da alumina úmida de um experimento de laboratório de um leito fluidizado em um processo descontínuo, ou seja, em

batelada. O modelo é baseado nas leis de conservação de massa e energia e em uma correlação empírica para calor e transferência de massa entre as fases.

Kemp (2007) apresenta uma análise crítica da ampla gama de modelos teóricos e empíricos disponíveis na literatura para descrever processos de secagem e destacou modelos simplificados podem ter melhor adequação ao propósito do que os complexos.

Groenold e Tsotsas (2007) investigaram a secagem do Al_2O_3 estudando a resistência interna e transferência de calor para uma variedade de amostras de Al_2O_3 , e seu modelo é baseado na teoria do fluxo bifásico de fluidização.

Tacidelli et al. (2012), desenvolve um modelo de duas fases, nas quais contemplam a fase particulada como mistura perfeita e a fase gás como plug-flow.

Gagnon et al. (2021), em um trabalho mais recente, utiliza um modelo de duas fases com configuração de tanques em série, levando em consideração desvios de gás esperados (bolhas) e mistura axial do produto.

3.6 PID Incremental

O PID Incremental é uma variação do controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) comumente utilizado em sistemas de controle de processos. Enquanto o PID tradicional calcula o valor do controle a ser aplicado com base no erro atual e nos erros passados, o PID Incremental calcula o valor de controle incrementando o valor de controle anterior com uma correção adicional.

A principal vantagem do PID Incremental é a sua robustez em relação a perturbações externas, uma vez que o controle é baseado nas variações do valor de controle ao longo do tempo, em vez de depender diretamente do erro atual. Isso pode ser particularmente útil em sistemas sujeitos a perturbações frequentes ou variáveis.

Além disso, o PID Incremental evita problemas comuns associados ao termo integral do PID tradicional, como o efeito de windup, que ocorre quando a integral acumulada se torna muito grande devido a um erro persistente, resultando em oscilações excessivas ou overshoot no sistema controlado.

No entanto, o PID Incremental também apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de um algoritmo adicional para converter o valor de controle incremental em um sinal de controle absoluto e a complexidade adicional na implementação e ajuste dos parâmetros do controlador.

Em resumo, o PID Incremental é uma técnica de controle que oferece robustez e estabilidade em relação a perturbações externas, sendo uma opção viável em muitos sistemas de controle de processos (Seborg et al., 2017).

3.7 Linguagem *Python*

Python é uma linguagem de programação amplamente estabelecida e de uso geral, concebida por Guido van Rossum, um programador de computador holandês, como um projeto de hobby para passar o tempo durante o Natal de 1989. O nome da linguagem é uma homenagem ao grupo de comédia britânico "*Monty Python*", do qual o criador era um grande admirador. A primeira versão do código foi lançada em 1991, incluindo funcionalidades de tratamento de dados e erros. Atualmente, a linguagem está na versão 3, lançada em dezembro de 2008.

Em resumo, *Python* é uma linguagem de programação de alto nível, com sintaxe simples, interpretada ou de script, de tipagem dinâmica e forte, e é multiplataforma e multiparadigma (Silva, Jéssica Brito, 2023). Isso implica que:

- Sua linguagem é mais próxima da linguagem humana em comparação com outras linguagens de programação, como C e C++ (AMAZON WEB SERVICES, 2023);
- Sua sintaxe é muito semelhante ao inglês e usa poucas marcações, o que facilita o trabalho do desenvolvedor na leitura e compreensão do código;
- Utiliza um programa chamado "interpretador" para traduzir o código *Python* para a linguagem de máquina de forma minuciosa e detalhada, ajudando a evitar erros conhecidos como "bugs".
- O programa possui a capacidade de identificar o tipo de variável declarada, fazendo uma distinção clara entre eles;
- Opera em diversos sistemas operacionais, incluindo Windows, Linux e MacOS;
- Segue o paradigma orientado a objetos, onde classes e objetos são utilizados para agrupar elementos da vida real com atributos e métodos similares, simplificando o

trabalho do desenvolvedor. No entanto, também pode ser utilizado de forma procedural, com linhas e funções escritas em forma de comandos, seguindo a ordem de execução desejada. Trata-se de um software de código aberto, podendo ser baixado e utilizado gratuitamente, sendo mantido pela Python Software Foundation e por uma vasta comunidade de colaboradores ao redor do mundo.

Por outro lado, a linguagem *Python* apresenta desvantagens principalmente para programadores iniciantes, entre elas a velocidade, por ser uma linguagem interpretada, suas aplicações podem apresentar lentidão em comparação com aquelas desenvolvidas em linguagens como C++ ou Java.

Diante do alto número de equações a serem resolvidas, o custo computacional aumentou, o que tornou o programa feito em *Python* muito lento. Logo, para solucionar este impasse foi utilizado o *Cython* o qual é uma linguagem de programação que combina a facilidade de uso do *Python* com a capacidade de escrever código em C e C++. Ele é usado principalmente para melhorar o desempenho de programas Python, permitindo que partes críticas do código sejam escritas em C ou C++ e depois integradas ao código *Python*. Isso resulta em execução mais rápida e eficiente, especialmente para computação intensiva e processamento de grandes volumes de dados (*Cython Documentation*, 2024)

3.8 Qt Designer

O Qt Designer é uma ferramenta de design gráfico integrada ao framework Qt, utilizado para criar interfaces gráficas de usuário (GUIs) de forma visual. Ele permite aos desenvolvedores projetarem e personalizar interfaces de usuário de maneira intuitiva, usando uma variedade de widgets e layouts disponíveis. O Qt Designer gera arquivos de descrição de interface gráfica em formato XML, que são posteriormente integrados ao código-fonte do aplicativo desenvolvido em C++, *Python* ou outras linguagens suportadas pelo Qt (*Qt Documentation*, 2024).

Essa ferramenta foi utilizada para criar uma interface gráfica intuitiva, na qual o usuário pode realizar as simulações, analisar a dinâmica do processo, bem como introduzir perturbações em tempo real e então verificar os efeitos sobre as variáveis de processo. Além disso, para facilitar o uso da interface, foi criada uma planilha em Excel, na qual o usuário entra com todas

as informações necessárias para a simulação, e depois clica em um botão no qual aciona a interface gráfica construída para realização das simulações

3.9 Método das Diferenças Finitas

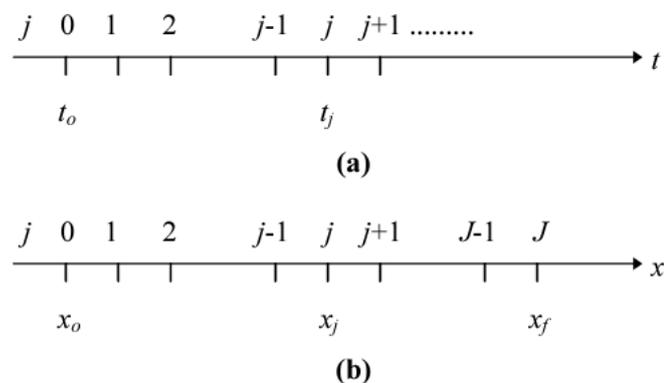
O método das diferenças finitas é uma abordagem utilizada para resolver problemas que envolvem equações diferenciais, sejam elas ordinárias ou parciais, com condições de contorno ou de valor inicial. Este método é aplicável para resolver equações de modelos com parâmetros concentrados ou distribuídos.

O objetivo principal do método das diferenças finitas é converter um problema diferencial em um problema composto por equações algébricas. Para isso, o primeiro passo é discretizar o domínio da variável independente. Isso significa dividir o domínio de cálculo em um número finito de subdomínios. Em um domínio semi-infinito, há infinitos subdomínios, enquanto em um domínio finito, o número de subdomínios é finito, geralmente representado por J .

Independentemente do tipo de domínio, são estabelecidos pontos que delimitam os subdomínios. Em um domínio finito, por exemplo, esses pontos são igualmente espaçados e totalizam $(J+1)$ em número.

É importante observar que os subdomínios podem ter dimensões uniformes, resultando em uma malha uniforme, ou não, o que gera uma malha não uniforme. Embora discretizações com malhas uniformes sejam mais simples, em muitos casos, o uso de malhas não uniformes pode oferecer vantagens numéricas (J. C. C. S. Pinto e P. L. C. Lage, 2024)

Figura 7 - Discretização de domínios unidimensionais: (a) semi-infinito, (b) finito.



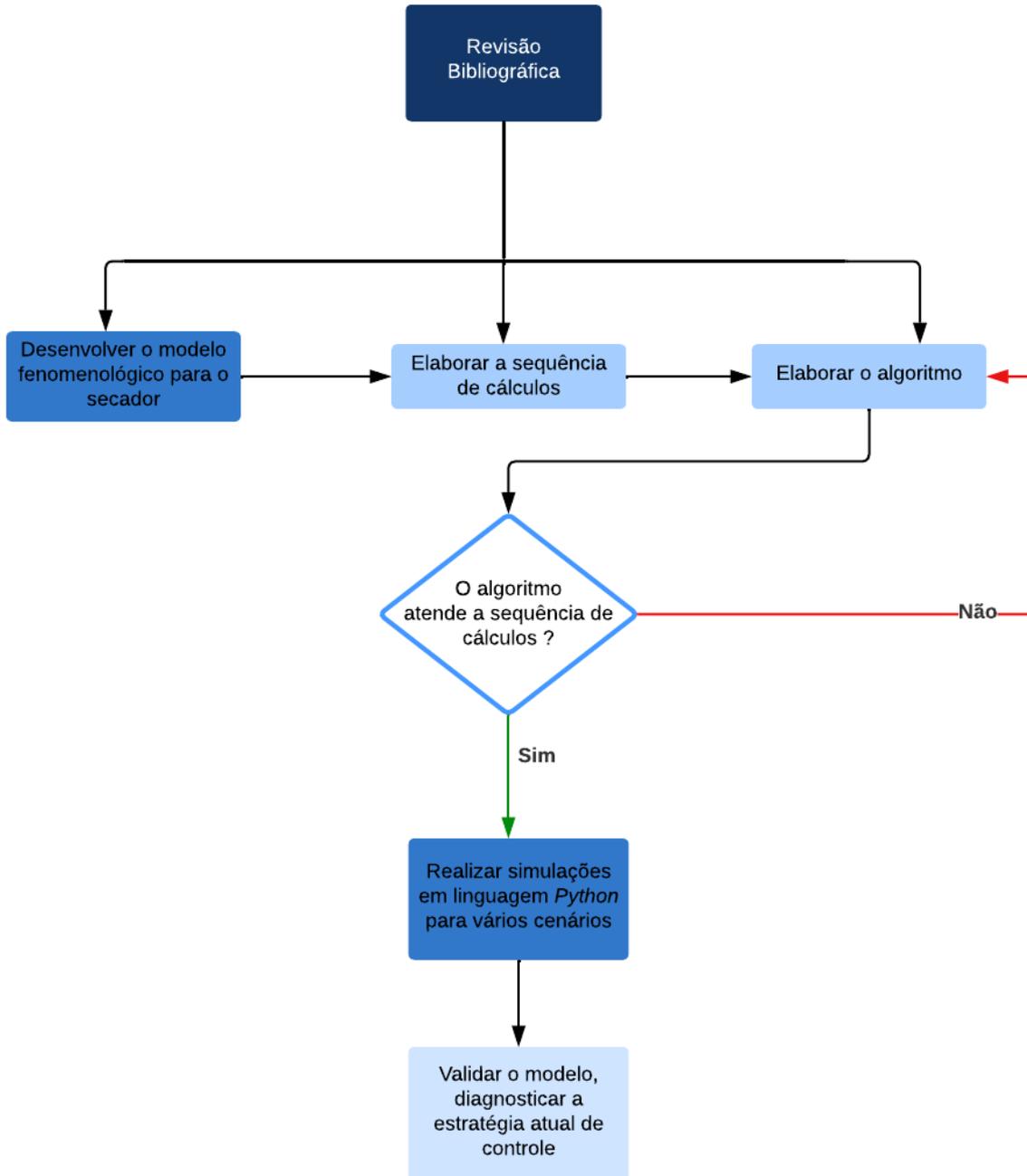
A substituição das derivadas existentes nas equações diferenciais pelas suas aproximações por diferenças finitas leva a sistemas de equações algébricas, que solucionam a EDO, ou sistema de EDO's, de forma aproximada.

Dessa forma, foi realizada uma revisão bibliográfica robusta, na qual foi possível descrever o processo produtivo do PVC e as suas principais características, bem como conhecer alguns trabalhos científicos envolvendo leite fluidizado. Dentre estes trabalhos, o de Tacidelli et al (2012) foi o que melhor descreveu o processo de secagem de resina de PVC em leite fluidizado. Porém, não foi encontrado na literatura um trabalho que modelou secador com múltiplas zonas, já que na indústria é comum ter secadores com mais de uma zona.

4. Metodologia

A metodologia consistiu inicialmente em uma revisão acerca dos princípios da modelagem da secagem. Logo após, foi desenvolvido o modelo para o secador baseado nas leis de conservação de massa e energia considerando uma zona homogênea e posteriormente adaptado para múltiplas zonas, e então elaborou-se a sequência de cálculos. Além disso, o modelo foi simulado em linguagem *Python* com diversos cenários. Por fim, essas etapas foram integradas, e os resultados foram avaliados e discutidos, além de fornecer um diagnóstico da atual estratégia de controle. A Figura 8 abaixo descreve a metodologia que foi utilizada para realização deste trabalho.

METODOLOGIA



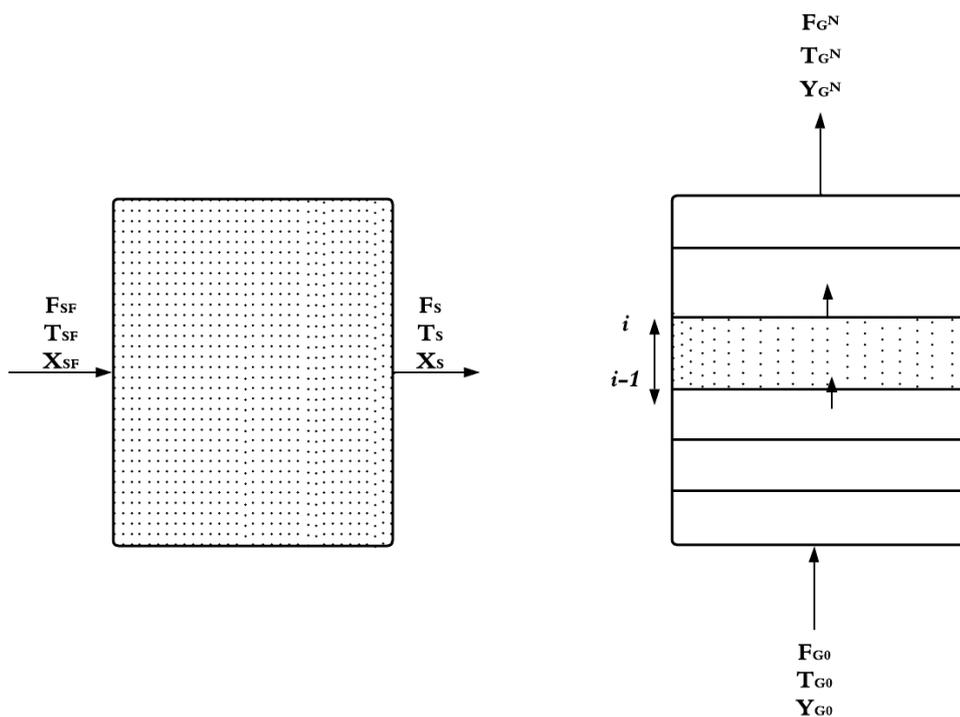
Fonte: Autora (2023)

4.1. Desenvolvimento do modelo

A construção deste modelo dinâmico do secador teve como referência principal o artigo de Tacidelli et al. (2012), sendo as equações enumeradas de 1 a 44 provenientes deste artigo. O processo é representado por um modelo de dois fluidos conforme ilustrado na Figura 7. Um dos fluidos é o gás que é forçado verticalmente através do leito de partículas fluidizadas, em hipótese, por regime *plug-flow*. A fase particulada é tratada como uma mistura globalmente homogênea.

O modelo matemático é baseado nas equações de conservação de massa e energia para os dois fluidos em regime dinâmico. Para modelagem da interação entre o leito homogêneo e o gás em fluxo ascendente, considerou-se o leito como composto por células horizontais.

Figura 9 – Representação do modelo de dois fluidos.



Fonte: Autora (2023)

Considerando os dois principais períodos no processo de secagem, temos:

- **1º período de secagem:** ocorre quando a água de uma partícula úmida com teor de umidade maior que a umidade crítica é removida. Neste caso, uma película (fina camada de líquido) cobre a superfície da partícula. Não há resistência interna à transferência de massa durante este período. A taxa de transferência de massa é descrita abaixo:

$$N_A = k_Y a_m (Y_G^* - Y_G) \quad (1)$$

- **2º período de secagem:** esse período inicia quando a umidade contida nas partículas atinge a umidade crítica, X_C . Neste momento, a película foi tão reduzida que pontos secos começam a aparecer na superfície da partícula, assim como são expostos os poros, e inicia-se o processo de difusão interna na partícula. Na ausência de referências bibliográficas ou experimentais para representar as resistências internas, Tacidelli et al (2012) propuseram a aplicação do fator apresentado na Equação 2, sobre a taxa de transferência de massa observada na umidade X_C .

$$N_A = N_{AC} \frac{(X_S - X_S^*)}{(X_C - X_S^*)} \quad (2)$$

A taxa de transferência de massa entre as fases na i -ésima célula é dada pela Equação (3a) para o primeiro período de secagem, e Equação (3b) para o segundo período de secagem:

$$m^i = V^i N_A^i = V^i k_Y a_m (Y_G^{i*} - Y_G^i) \quad (3a)$$

$$m^i = V^i N_A^i = V^i k_Y a_m (Y_G^{i*} - Y_G^i) \frac{(X_S - X_S^*)}{(X_C - X_S^*)} \quad (3b)$$

A taxa total de transferência de massa entre a fase particulada e gás é dada pela soma das taxas de transferência de massa em cada célula do secador de acordo com a Equação (4a) para o primeiro período de secagem, e Equação (4b) para o segundo período de secagem:

$$m_T = \sum_1^n V^i N_A^i = \sum_1^n V^i k_Y a_m (Y_G^{i*} - Y_G^i) \quad (4a)$$

$$m_T = \sum_1^n V^i N_A^i = \sum_1^n V^i k_Y a_m (Y_G^{i*} - Y_G^i) \frac{(X_S - X_S^*)}{(X_C - X_S^*)} \quad (4b)$$

Foram realizados os balanços de massa e energia para a fase gás, com variação no tempo e espaço:

Foram realizados os balanços de massa e energia para a fase particulada, com variação no tempo e espaço:

$$\frac{\partial(\rho_G Y_G)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_G v_Z Y_G)}{\partial z} = m_A \quad (5)$$

Discretizando implicitamente no espaço, obtém-se:

$$\frac{\partial(\rho_G v_Z Y_G)}{\partial z} = \frac{\rho_G v_Z (Y_G^i - Y_G^{i-1})}{\Delta Z} \quad (6)$$

Multiplicando pela área transversal (A_t), tem-se:

$$\frac{\partial(\rho_G v_Z Y_G)}{\partial z} = \frac{\rho_G v_Z (Y_G^i - Y_G^{i-1})}{\Delta Z} \cdot A_t / A_t \quad (7)$$

Considerando que $A_t \cdot \Delta Z = V$ e que $F_G = \rho v_Z A_t$, e substituindo na Equação (7):

$$\frac{d\rho_G Y_G}{dt} + \frac{F_G (Y_G^i - Y_G^{i-1})}{V^i \varepsilon_G} = m_A \quad (8)$$

Obtendo assim a equação discretizada abaixo:

$$\frac{dY_G}{dt} = \frac{F_G(Y_G^{i-1} - Y^i) + m_A V^i \varepsilon_G}{V^i \varepsilon_G \rho_G} \quad (9)$$

Analogamente, para o balanço de energia, obtém-se:

$$\frac{dT_G^i}{dt} = \frac{F_G C_{PG}^{i-1} (T_G^{i-1} - T_{ref}) - F_G C_{PG}^i (T_G^i - T_{ref}) + V^i h_G a_C (T_S - T_G^i) + m^i C_{PA} (T_S - T_G^i) + Q_G}{V^i \varepsilon_G \rho_G^i C_{PG}^i} \quad (10)$$

Para a fase particulada, é assumida uma mistura perfeita (homogênea), como dito anteriormente, portanto os balanços de massa e energia para são descritos pelas Equações (11) e (12) abaixo.

$$\frac{dX_S}{dt} = \frac{F_S (X_{SF} - X_S) - m_T}{V_T \varepsilon_S \rho_S} \quad (11)$$

$$\frac{dT_S}{dt} = \frac{F_S (C_{PS}^{TF} + C_{PL}^{TF} X_{SF}) (T_{SF} - T_{ref}) + \Sigma h_G a_C V^i (T_G^i - T_S) - F_S (C_{PS}^{TS} + C_{PL}^{TS}) (T_S - T_{ref}) - m_T \lambda_{TS}}{V_T \varepsilon_S \rho_S (C_{PS}^{TS} + C_{PL}^{TS} X_S)} \quad (12)$$

4.1.2. Parâmetros do modelo

- Diâmetro da partícula úmida:

Caso $X_S > X_C$:

$$d_p = dp_d \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_L} X_C + \frac{\rho_s}{\rho_L} X_S \right)^{1/3} \quad (13)$$

Onde:

ρ_s = densidade da partícula seca [kg/m³]

ρ_L = densidade da água líquida [kg/m³]

dp_d = diâmetro da partícula seca [m]

Caso contrário:

$$d_p = dp_d$$

- Densidade da fase gasosa úmida em base úmida [kg/m³]:

$$\rho_G = \frac{\frac{P}{RT_G} (1 + Y_G)}{\frac{Y_G}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \quad (14)$$

Onde:

P = Pressão [N/m²]

Y_G = Umidade do ar (base seca)

T_G = Temperatura do ar [K]

- Viscosidade da Fase Gasosa [kg.m/s]:

$$\begin{aligned} \mu_G = & 1,69111 \cdot 10^{-5} + 4,98424 \cdot 10^{-8} (T_G - 273,15) \\ & - 3,18702 \cdot 10^{-11} (T_G - 273,15)^2 \\ & + 1,31965 \cdot 10^{-14} (T_G - 273,15)^3 \end{aligned} \quad (15)$$

- Velocidade Espacial [m/s]:

$$v = \frac{F_G * (1 + Y_G)}{\rho_G A_S} \quad (16)$$

Onde:

A_S = Área superficial = comprimento * largura da caixa do secador [m²]

F_G = vazão de gás seco [kg/s]

- Reynolds da partícula e Velocidade mínima de fluidização:

$$Re_p = \frac{d_p F_G * (1 + Y_G)}{\mu_G} \quad (17)$$

$$v_{min} = \frac{Re_{pmin} \mu_G}{\rho_G d_p \phi} \quad (18)$$

$$Re_{pmin} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408 Ar} - 33,7 \quad (19)$$

Se $d_p > 100\mu m$:

$$Ar = \frac{\rho_G (\rho_s - \rho_G) g (d_p \phi)^3}{\mu_G^2} \quad (20)$$

Onde Ar é o Número de Arquimedes e ϕ é a esfericidade da partícula.

Se $d_p < 100\mu m$:

$$Re_{pmin} = \frac{9,4 \cdot 10^{-4} (\rho_s - \rho_G)^{0,934} g (d_p \phi)^{1,8}}{\mu_G^{0,87} \rho_G^{0,066}} \quad (21)$$

- Fração volumétrica gasosa mínima do leito (ε_{Gmin}):

$$\frac{\varepsilon_{Gmin}^3}{1 - \varepsilon_{Gmin}} = \frac{150 \mu_G v_{min}}{(\rho_s - \rho_G) g (d_p \phi)^2} \quad (22)$$

- Fração volumétrica do sólido na velocidade de operação (ε_S):

$$\varepsilon_S = 1 - \varepsilon_G \quad (23)$$

- Área superficial da partícula $a_C [\text{m}^2\text{m}^{-3}]$:

$$a_C = a_m = \frac{6\varepsilon_S}{d_p\phi} \quad (24)$$

- Condutividade térmica da fase gasosa $[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$:

$$k_G = 3,48863 \cdot 10^{-3} + 7,58 \cdot 10^{-5} T_G \quad (25)$$

- Coeficiente de troca térmica:

$$Nu_p = \frac{h_G d_p}{k_G} = 0,03 Re_p^{1,3} \quad (26)$$

- Coeficiente de Difusividade $[\text{m}^2/\text{s}]$:

$$D_{AB} = 2,6 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T_G}{298} \right)^{1,8} \quad (27)$$

- Cálculo do fluxo difusivo mássico $[\text{kg}/\text{s}/\text{m}^3]$:

$$N_A = k_Y a_m (Y_G^* - Y_G) \quad (28)$$

A analogia de Chilton-Colburn, relacionando as expressões de Nusselt e Sherwood, permite obter o valor do coeficiente convectivo:

$$Sh_p = \frac{k'_Y}{\rho_G D_{AB}} = 0,03 Re_p^{1,3} \quad (29)$$

Onde k'_Y é o coeficiente convectivo mássico em base úmida, e k_Y é o coeficiente convectivo mássico em base seca.

A relação entre os dois coeficientes é:

$$k_Y = \frac{k'_Y}{(1 + Y_G^*)(1 + Y_G)} \quad (30)$$

- Pressão de vapor de água pela equação de Antoine [N/m²]:

$$P_V^A = \frac{1,01325 \cdot 10^5}{760} 10^{(a1 - \frac{a2}{a3 + T_S - 273,15})} \quad (31)$$

Onde $a1 = 7,96681$, $a2 = 1668,21$ e $a3 = 228$.

- Umidade do ar no equilíbrio:

$$Y_G^* = \frac{P_V^A M_A}{(P - P_V^A) M_B} \quad (32)$$

Onde M_A é o peso molecular da água [kg/kgmol] e M_B é o peso molecular do ar.

- Reynolds da água dentro dos tubos (conjuntos de serpentina):

$$Re_w = \frac{D_i m_w}{A_t \mu_W} \quad (33)$$

- Nusselt de troca de calor interna ao tubo (em regime turbulento, se $Re_w > 2100$):

$$Nu_w = \frac{h_i D_i}{k_w} = 0,023 Re_w^{0,8} Pr_w \left(\frac{1}{3}\right) \quad (34)$$

- Nusselt de troca de calor interna ao tubo (em regime laminar, se $Re_w < 2100$):

$$Nu_w = 3,657 \quad (35)$$

- Coeficiente de película externo h_e , entre o gás e os tubos de aquecimento, para tubos verticais, é calculado pela equação abaixo:

$$\frac{h_e d_p}{k_G} = 0,88 \cdot \left(\frac{\rho_G (\rho_P - \rho_G) g d_p^3}{\mu_G^2} \right)^{0,213} \quad (36)$$

- O coeficiente global de troca térmica, base superfície externa é calculado através da Equação 37 disposta abaixo:

$$\frac{1}{U_e} = \frac{D_e}{h_i \cdot D_i} + \frac{D_e \ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right)}{2k_t} + \frac{1}{h_e} \quad (37)$$

- Dessa forma, o calor total trocado pela serpentina na célula é:

$$q_T^i = U_e \cdot A_{ei} \cdot (T_w^i - T_G^i) \quad (38)$$

- O cálculo de temperatura de saída da água T_{w2} é obtido através da equação de conservação de energia:

$$T_{w2} = T_{w1} - \frac{q_t^i}{m_w C_{pw}} \quad (39)$$

- Prandtl da água líquida:

$$Pr_w = 0,0008.T^2 - 0,6688.T + 139,98 \quad (40)$$

- Viscosidade da água [kg/m.s]:

$$\mu_L = 4,6805.10^{-8}.T^2 - 3,8216.10^{-5}.T + 8,0165.10^{-3} \quad (41)$$

- Condutividade da água líquida [W/m.K]:

$$k_w = -7,4558.10^{-6}.T^2 + 5,9232.10^{-3}.T - 4,9491.10^{-1} \quad (42)$$

4.2. Características do secador e condições de processo

Para modelar o secador é necessário obter as características do secador e as condições de processo. Devido ao sigilo industrial, foram utilizados valores “aleatórios”, os quais estão dispostos abaixo:

- P = pressão de operação = 1 atm = $1,01325.10^5$ N/m² (N/m² = Pa)
- H = altura do leito = 2,0 m
- W = largura do leito = 6,0 m
- L = comprimento do leito = 9,5 m
- Elemento de aquecimento interno, serpentina:

Considerados todos os tubos na vertical com fluxo de água ascendente (co-corrente com o ar).

- $Q_W =$ Vazão de água nos tubos [m³/s] = 300 m³/h
- $T_{W_i} =$ Temperatura de entrada de água quente da serpentina = 100°C
- $D_i =$ diâmetro interno da tubulação 1" Sch 10S das serpentinas = 0,02786 m
- $D_e =$ diâmetro externo da tubulação das serpentinas = 0,0334 m
- $N_S =$ Número de blocos serpentinas = 15, com 266 tubos cada
- $N_t =$ Número total de tubos efetivos = 966
- $L_t =$ comprimento de cada tubo = 0,9 m
- $L_S =$ comprimento total de tubos nas serpentinas = 2.633 m

Seja n o número de células utilizadas (para este modelo foram utilizadas 20 células, visto que este valor pode ser modificado), a seção transversal, área interna e externa, na célula i , do conjunto de tubos da serpentina, respectivamente, são calculadas conforme as Equações 43 a 45:

$$A_t = \frac{\pi}{4} * D_i^2 * N_t \quad (43)$$

$$A_{ii} = \frac{\pi * D_i * L_S}{n} \quad (44)$$

$$A_{ei} = \frac{\pi * D_e * L_S}{n} \quad (45)$$

4.3. Sequência de Cálculos

Considerando o secador com uma zona completamente homogênea, foi desenvolvida a sequência de cálculos que está disposta abaixo:

Os valores do estado do secador [TS, XS, n x (FG, TG, YG)] foram guardados em vetores para cada passo de integração, em uma matriz, de forma que ao final da integração todo perfil temporal estará disponível para plotagem e análise. Eventualmente, outras informações podem ser registradas nestes vetores, conforme o interesse no momento.

i. Dados de Entrada:

- Caracterização do secador, da resina e das condições operacionais de carga, ar quente e água quente;
- Conversão de unidades;
- Geração de vetores com valores de F_{G0} , T_{G0} , Y_{G0} , F_{SF} , T_{G0} , X_{SF} , Q_{w0} , T_{w0} de forma a introduzir variações ao longo do tempo de integração, por exemplo, para teste de estratégias e controle;
- Valores de inicialização em $t=0$, vetor $[T_S, X_S, n \times (F_G, T_G, Y_G)]$.

ii. Loop de integração temporal:

- Cálculo das propriedades do sólido (d_p, ρ_s)

iii. Loop das células:

- Densidade da fase gasosa úmida base úmida;
- Viscosidade da fase gasosa;
- Velocidade espacial;
- Número de Reynolds da partícula;
- Número de Arquimedes;
- Número de Reynolds da partícula para velocidade mínima de fluidização;
- Velocidade espacial mínima para fluidização;
- Fração volumétrica de gás e sólido na velocidade de operação;
- Área específica para troca de massa e calor;
- Condutividade térmica da fase gasosa;
- Número de Nusselt para troca térmica gás x leito;
- Coeficiente de troca térmica gás x leito;
- Taxa de Calor Transferido gás x leito;
- Coeficiente de difusividade vapor de água em ar;
- Número de Sherwood;
- Coeficiente convectivo;
- Pressão de vapor da água;

- Umidade de saturação da água no ar;
- Fator de redução para $X < X_C$;
- Taxa de Evaporação;
- Condutividade do metal do tubo;
- Calor específico da água líquida;
- Prandtl da água líquida;
- Viscosidade da água líquida;
- Condutividade da água líquida;
- Densidade da água líquida;
- Velocidade da água nos tubos;
- Número de Reynolds da água dentro dos tubos;
- Número de Nusselt da troca de calor interna ao tubo;
- Coeficiente de Película Interno;
- Coeficiente de película externo;
- Coeficiente Global de Troca Térmica, Base Parede Externa do Tubo;
- Taxa de Calor Trocado Serpentina x Gás;
- Balanço de Energia da Água Circulante;
- Cálculo da temperatura da água quente no topo da célula (T_w^i);
- Balanço de Massa da Fase Gasosa;
- Balanço de Energia da Fase Gasosa;
- Cálculo dos valores de Y_G e T_G em $t+1$;
- Atualização do vetor do estado do secador em $t+1$ para aquela célula;
- Acumula o total de água evaporado e o total de calor trocado entre o leito e o gás;
- Repete para todas as células.

iv. *Fim do Loop das Células:*

- Balanço de massa e energia do leito, limitando $X_S \geq X_E$;
- Novos valores de temperatura e umidade do leito;
- Atualização do vetor do estado do secador em $t+1$ para novos valores do leito
- Avança contador de tempo;
- SE $t < t_{\text{limite}}$, reiniciar Loop das Células, SENÃO finalizar o loop de integração.

v. *Fim do Loop de Integração:*

É importante salientar que foi utilizado o método de Euler para resolução das EDO's (balanços de massa e energia), como disposto abaixo:

- Cálculo da temperatura do leito ao final do step de integração

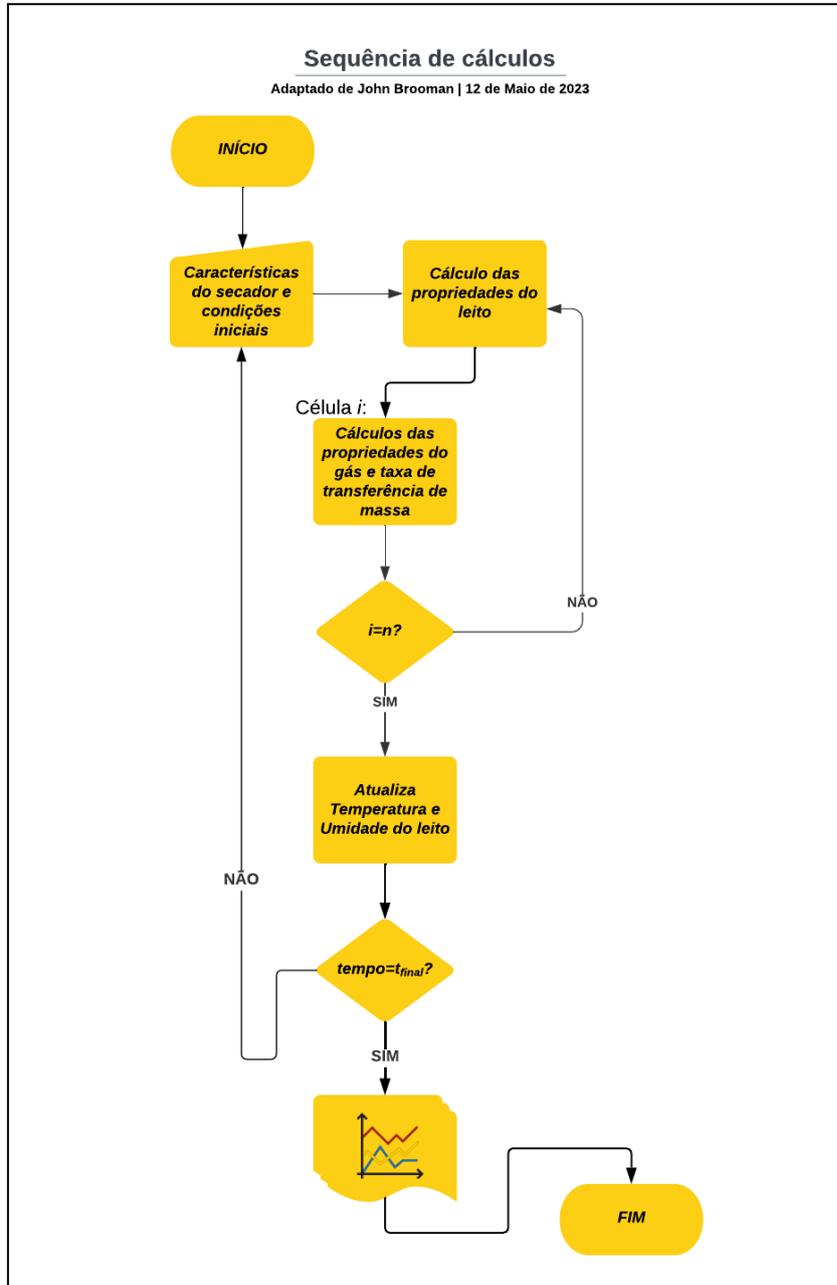
$$T_S^t = T_S^{t-1} + \frac{dT_S}{dt} \times \Delta t \quad (46)$$

- Cálculo da umidade ao final do passo de integração

$$X_S^t = X_S^{t-1} + \frac{dX_S}{dt} \times \Delta t \quad (47)$$

A rota de cálculos desenvolvida acima pode ser resumida pelo fluxograma abaixo conforme mostrado na Figura 10:

Figura 10 - Fluxograma da rota de cálculos.



Fonte: Autora (2023)

4.4. Adaptação do modelo para múltiplas zonas

É comum que secadores de leite fluidizado industriais geralmente possuem de três a mais zonas. Logo, partindo do modelo desenvolvido, adaptou-se o modelo de uma única zona para múltiplas zonas.

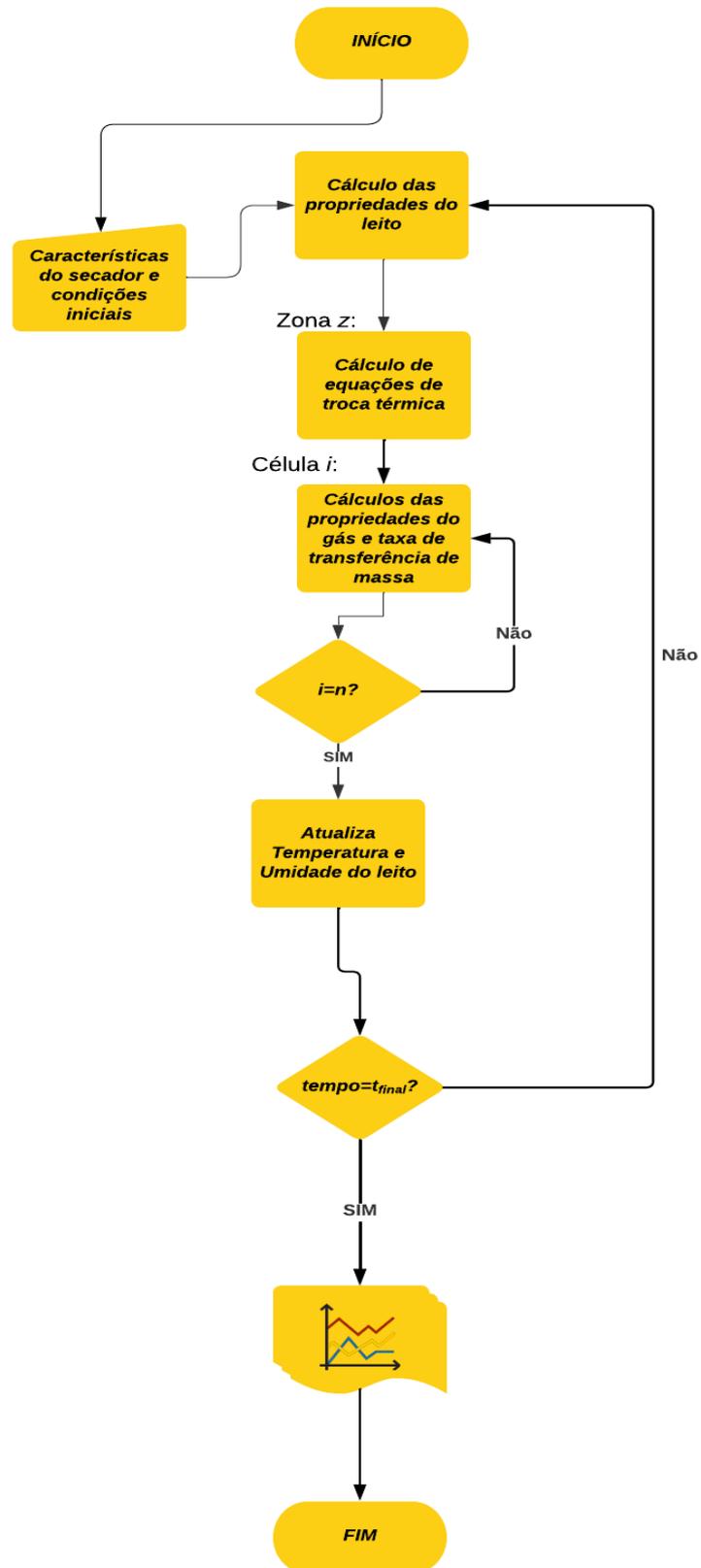
Os pontos principais são:

- As z zonas estarão em série em termos de sólido, com fluxo cruzado de gás. Assim, a saída de sólidos de uma zona é a alimentação de sólidos da zona seguinte.
- Cada zona será caracterizada como o secador no modelo de zona única, podendo ter valores diferentes entre si, por exemplo, com temperaturas de ar e de água quente diferentes.
- O número de células será o mesmo.

Assim, os valores em cada instante t , que eram contidos em vetores, passarão a ser contidos em matrizes ($n \times z$), e o conjunto total de dados ao longo da integração em um cubo ($n \times z \times t$).

A Figura 11 abaixo mostra a sequência de cálculos desenvolvida para secador de múltiplas zonas.

Figura 11 – Sequência de cálculos para modelagem de secador com múltiplas zonas.



Fonte: Autora (2023)

5. RESULTADOS

Nos Resultados foram apresentados a ferramenta elaborada em *Python*, discussões acerca de várias simulações realizadas para uma zona e múltiplas zonas, bem como uma análise da dinâmica do processo.

5.1. Ferramenta com interface gráfica

A Figura 13 abaixo mostra a planilha criada em Excel para entrada de dados necessários para realização da simulação (como propriedades e geometria do secador). Com os dados preenchidos, o usuário aperta um botão que se encontra nesta mesma planilha, visto que essa ação abre a interface na qual o usuário pode observar, em tempo real, os efeitos dos distúrbios introduzidos sobre as variáveis do processo. As Figuras 13 e 14 mostram a interface gráfica elaborada no QtDesigner.

Figura 12 – Planilha em Excel para entrada de dados para realização da simulação

Symbol	Value	Description	Classification
description	-	PVIC unit dryer model D-2301-A (Atagosa) Perfect mixing model with bed discretization for airflow	Description - Equipment
dp	0.0005	Average particle diameter [m]	Particle property
rhoS	802	Specific mass of the particles [kg/m ³]	Particle property
fi	1	Particle sphericity	Particle property
dpd	0.0004	Dry particle diameter [m]	Particle property
CPS	961.4	Particle-specific heat [J/(kg·°C)]	Particle property
L	0.9	Total coil tube length [m]	Heat exchange property
XC	0.124	Critical moisture content	Thermodynamic equilibrium
XE	0.002	Equilibrium moisture content	Thermodynamic equilibrium
P	101000	Operation pressure [N/m ²]	Other variables
T_ref	273.15	Reference temperature	Other variables
g	9.8	Gravity [m/s ²]	Other variables
n	20	Number of cells in each zone	Numerical method
passio	0.01	Time iteration step [s]	Numerical method
Sampling	100	In-sage chart sampling [s]	Numerical method
X50	0.01	Initial value of moisture content	Initial conditions
T50	50	Initial value of solid temperature [°C]	Initial conditions
TG0	30	Initial value of gas temperature [°C]	Initial conditions
YG0	0.03767	Inlet gas-phase humidity [kg/kg]	Start operation conditions
FG0	7.8	Particle-mass flow [ton/h]	Start operation conditions
XSF	0.33	Inlet particulate moisture content [kg/kg]	Start operation conditions
T5F	68	Inlet particulate temperature [°C]	Start operation conditions
QV	270	Heating water volumetric flow rate [m ³ /h]	Start operation conditions
Twi	75	Heating water inlet temperature [°C]	Start operation conditions
h	15	Bed height [m]	Start operation conditions
W	4.2	Dryer width [m]	Equipment geometry
Control_model	OFF	Controller module name (name = OFF, means no controller)	Control
Autosave	OFF	Automatic data saving	Save
Heat sources	ON	This indicates the existence or not of heat sources (coil) in the equipment. To simulate the equipment without the coil, the number of pipes in each zone in the line "Effective number of pipes in the zone" must be zero.	

Figura 13 – Aba com os resultados das variáveis de output em cada zona.

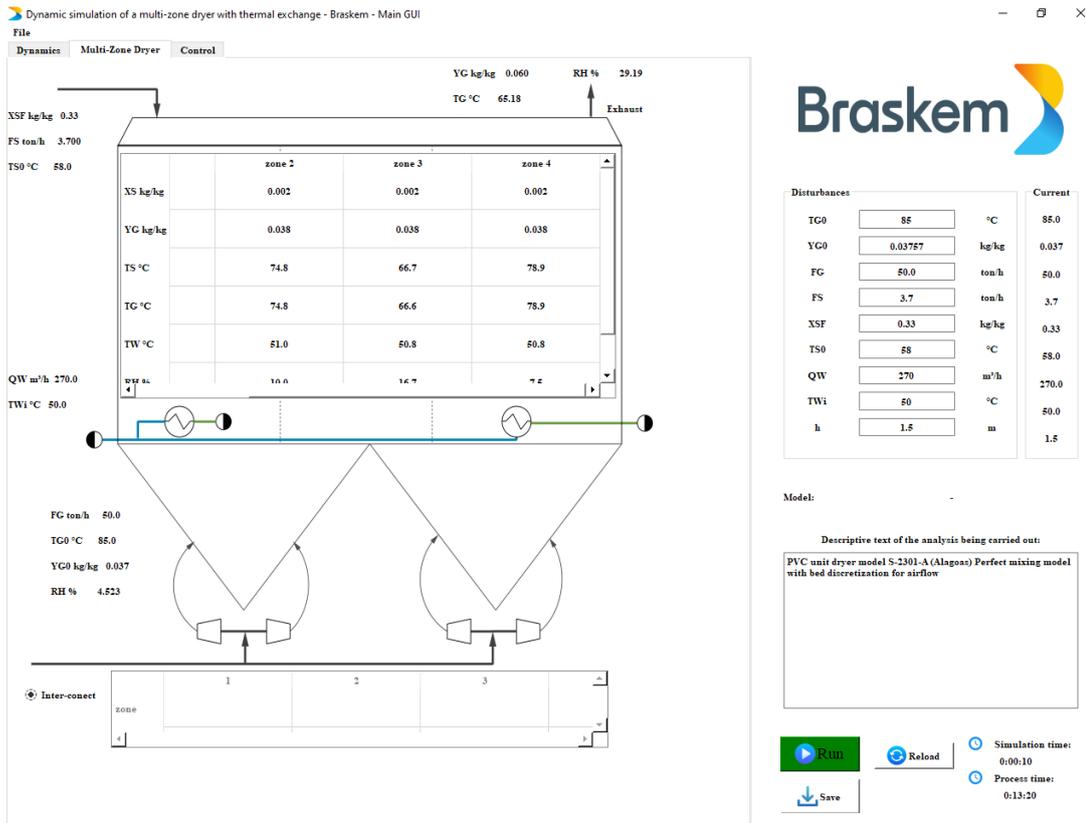
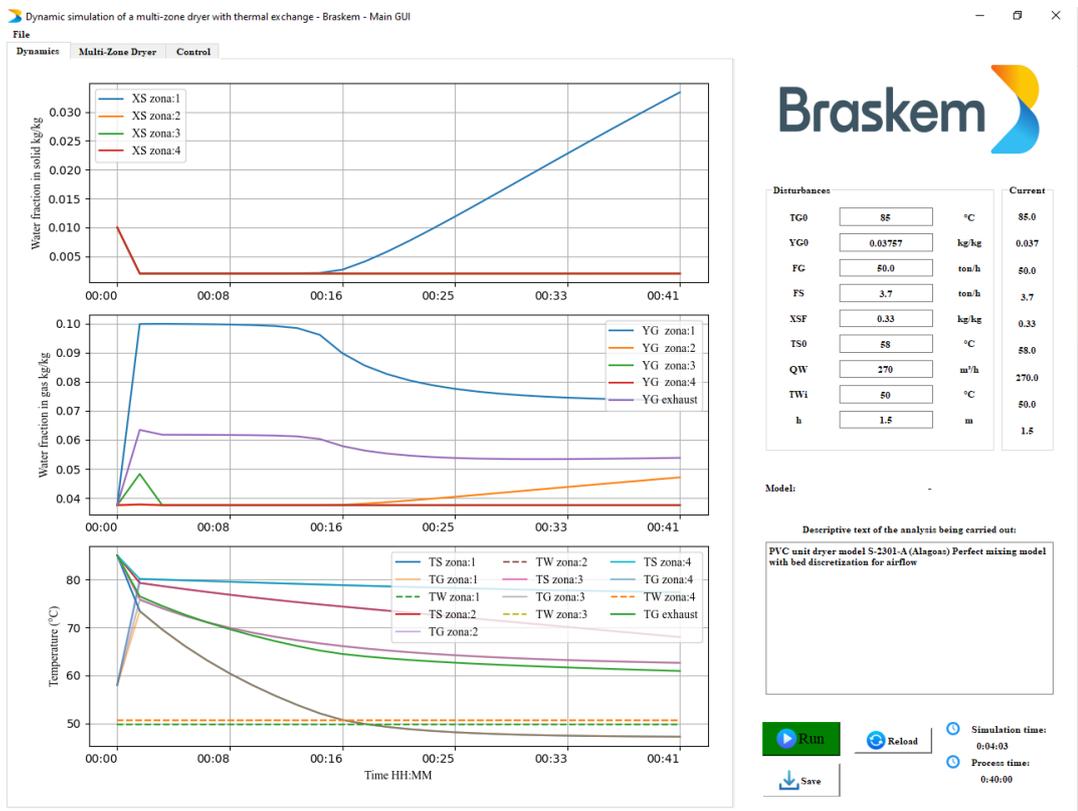


Figura 14 - Aba com os gráficos dinâmicos.



Na interface é possível acompanhar, no tempo, as variáveis dinâmicas do processo. O usuário pode observar tanto o tempo real da simulação, que está relacionada ao esforço computacional, e o tempo processo sendo simulado. Destaca-se, por exemplo que o processo tem um tempo de estabilização alto. Em outros termos, a dinâmica do processo é lenta o que demanda horas em tempo real para que o processo atinja um estado estacionário após a sua partida. O usuário também pode atuar no processo modificando as variáveis operacionais do processo no campo “disturbances”. Essas mudanças ou distúrbios do processo ocorrerão e tempo real de simulação e podem ser monitoradas na interface. O usuário pode, de igual modo salvar, os dados monitorados (arquivo será salvo em formato excel e csv).

5.2. Simulações realizadas para uma zona

Foi simulado um caso de referência com valores aleatórios:

- $F_S=7,0$ t/h
- $X_{SF}=0,33$
- $F_G=40$ t/h
- $Y_{G0}=3,757e-2$
- $Q_w=180$ m³/h
- $T_{Wi}=75$ °C
- $T_{G0}=93$ °C
- $T_{SF}=58$ °C
- $h=1,5$ metros

As variáveis de saída relevantes foram a umidade da partícula (X_s), umidade do gás (Y_G), temperatura do gás e do leito (T_G e T_s) e temperatura da água (T_w), umidade de equilíbrio (Y_G^*) e umidade relativa. Para inicialização, foi atribuída umidade do leito de 0,01 kg/kg. Para o caso de referência, observa-se o comportamento dinâmico apresentado nas figuras seguintes.

Figura 15 - Perfis de umidade e temperatura do leito e do gás no tempo considerando o caso de referência.

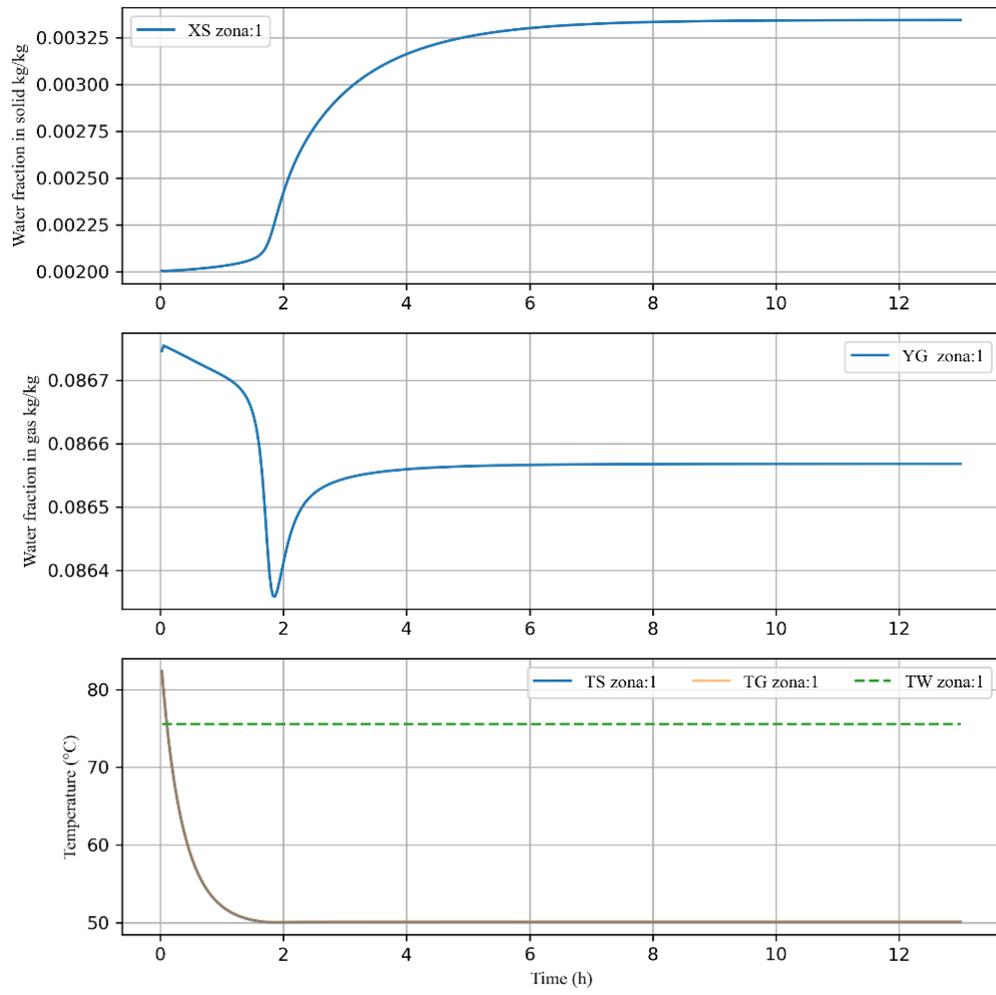
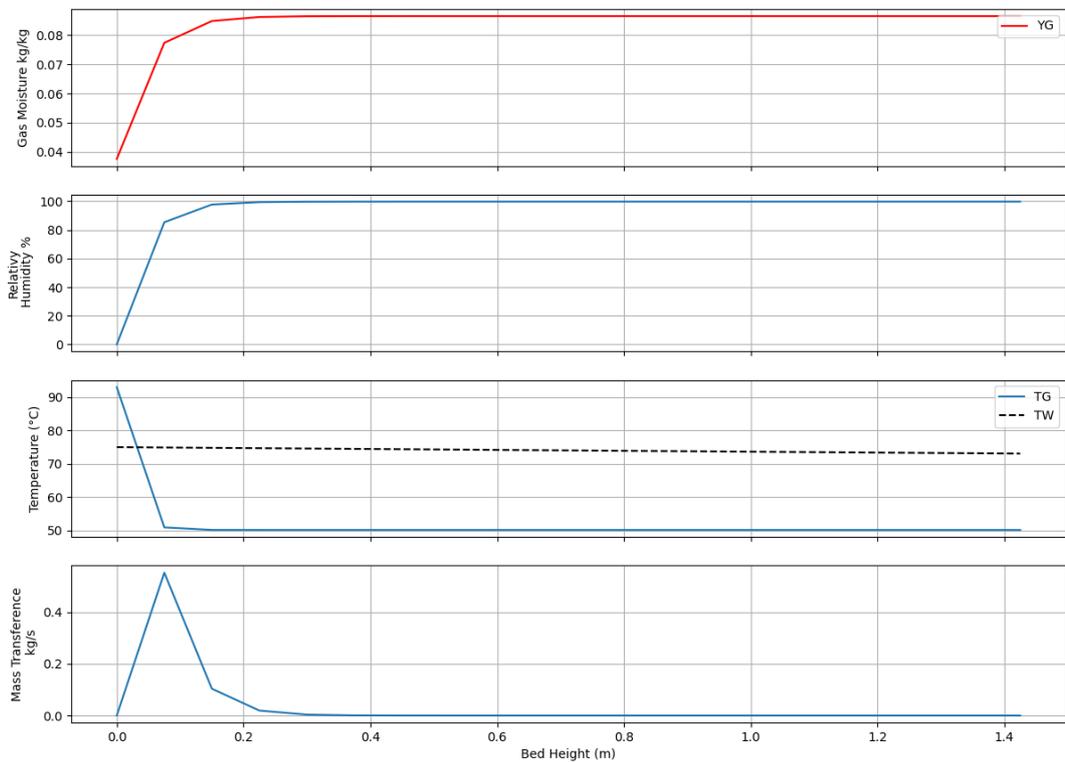


Figura 16 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor, considerando o caso de referência.



Como pode ser observado nas Figuras 16 e 17, a transferência de massa se concentra na célula 1. Foi feito o modelo com a discretização do leito com os sólidos no espaço. Ou seja, o fluxo das partículas úmidas é considerado contracorrente/concorrente em relação ao fluxo de gás. O outro modelo considera o leito uma mistura perfeita. A transferência de massa ocorre em todas as células, contudo para o modelo que foi utilizado (mistura perfeita), devido a aproximação utilizada, a transferência predomina no início. Isso ocorre porque no início o contato entre o gás e a partícula úmida tem o maior gradiente de concentração e de temperatura. Neste caso, um modelo mais próximo do real, esse contato promoveria uma rápida evaporação de toda umidade, inclusive a umidade nos poros. Isso pode ser observado para o modelo contracorrente e concorrente. Na primeira célula o ar carrega toda a umidade do sólido, embora esse montante de água não é grande o suficiente para saturar o ar. Ele continua insaturado e arrastando a umidade nas outras células.

No modelo de mistura perfeita, entretanto, como a umidade do leito é igual em todo o leito, a umidade que é carregada pelo ar na primeira célula não se limita a quantidade real de água que essa célula tem. Ou seja, o ar carrega mais umidade do que o que realmente tem. Isso dá a impressão de que apenas na primeira célula ocorre a transferência de massa. O que na verdade é a consequência da aproximação do modelo.

Tomando a simulação de referência, foram introduzidos distúrbios após ser atingida a condição estável e observados os efeitos.

Variante (I):

- **Acréscimo de 10% na carga de PVC:**

Figura 17 - Perfis de umidade e temperatura do leito e do gás no tempo considerando +10% sobre a carga de PVC.

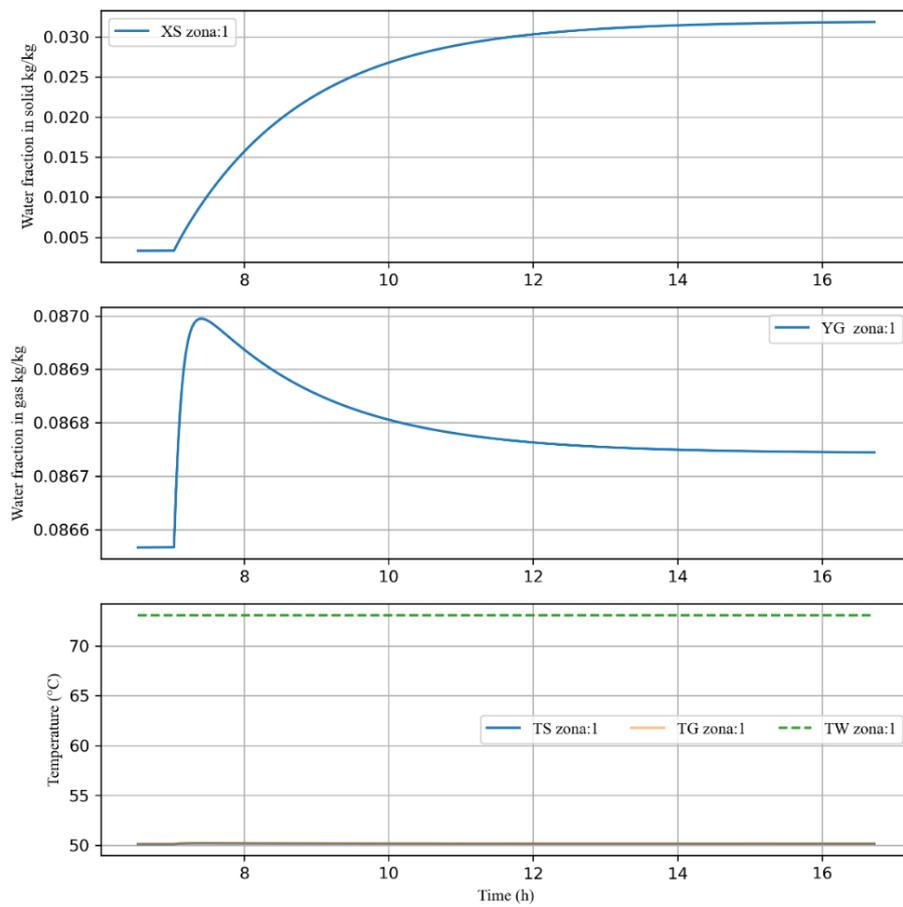
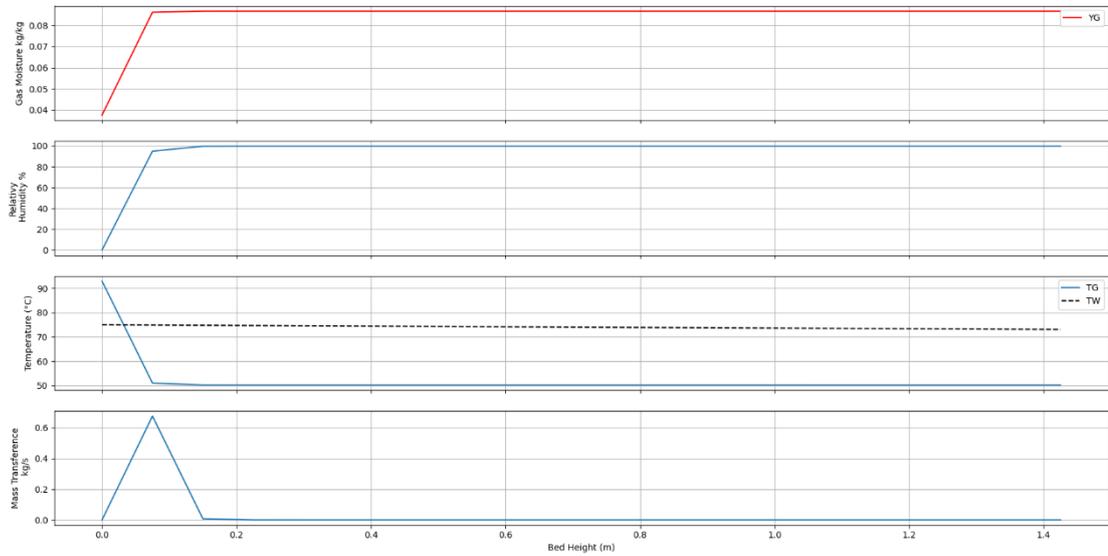


Figura 18- Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando +10% sobre a carga de PVC.



Com o acréscimo na carga de PVC na entrada do equipamento, como esperado, observa-se que a umidade do leito aumentou consideravelmente. Isso ocorreu porque uma maior quantidade de umidade foi introduzida ao leito, sendo a capacidade de arraste de umidade do ar mantida fixa. Além dessa observação, nota-se que a dinâmica do processo é lenta, demandando horas para se atingir um novo estado estacionário.

Variante (II):

- Decréscimo de 10°C na temperatura de entrada do bolo úmido:

Figura 19 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando -10°C sobre a temperatura de entrada do bolo úmido.

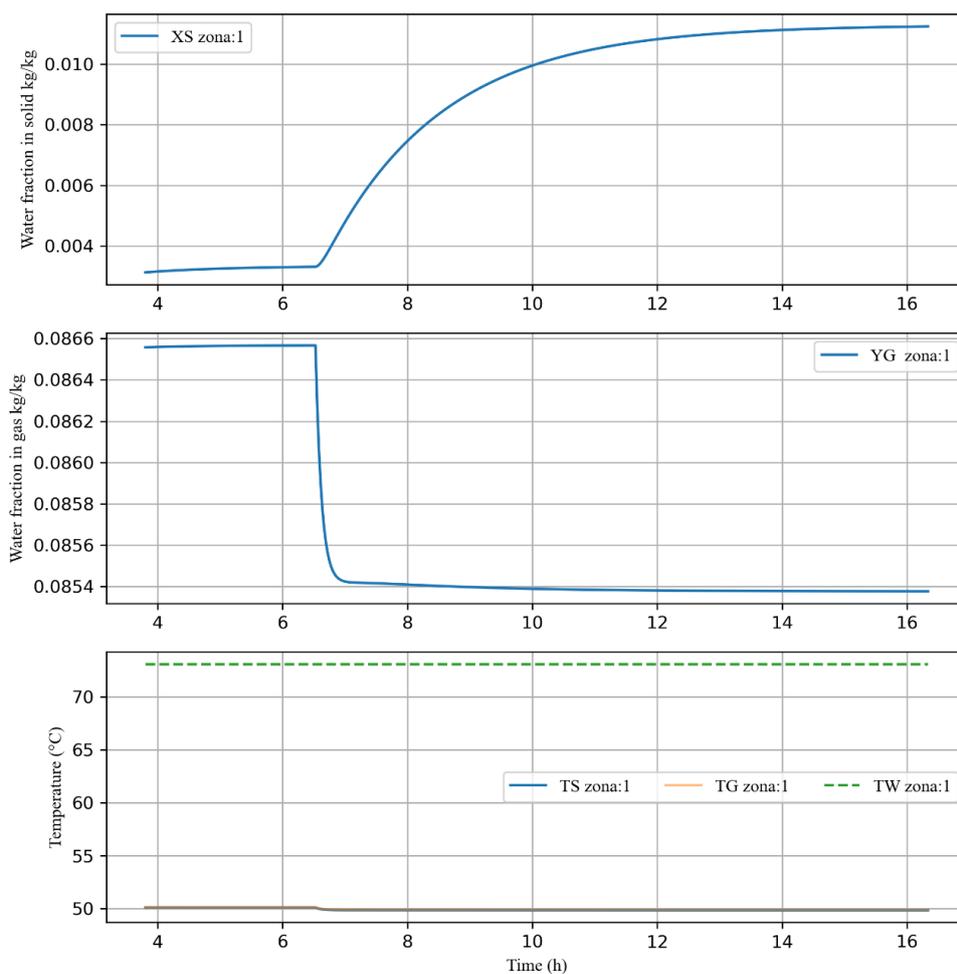
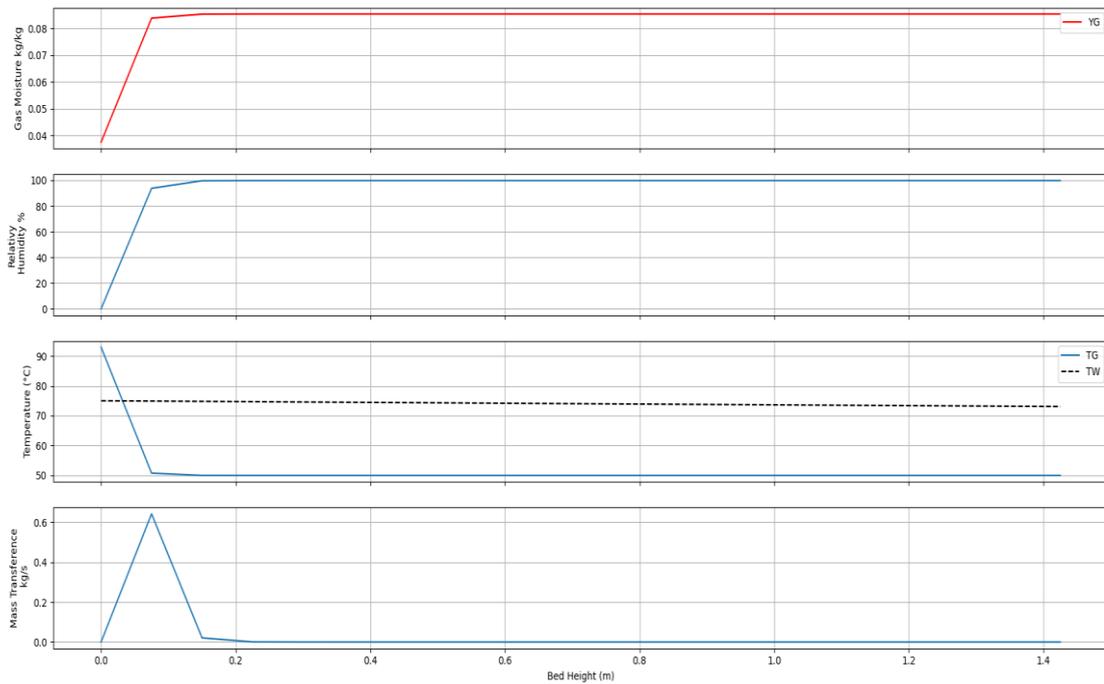


Figura 20 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -10°C sobre a temperatura de entrada do bolo úmido.



Com a diminuição da temperatura do sólido, há uma menor taxa de transferência de umidade para o gás. Isso ocorreu porque há uma diminuição na umidade de saturação do ar, devido a menor temperatura. Isso diminui a capacidade do ar de carregar umidade do leito.

Variante (III):

- **Decréscimo de 10°C na temperatura do ar quente:**

Figura 21- Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo considerando -10°C sobre a temperatura do ar quente.

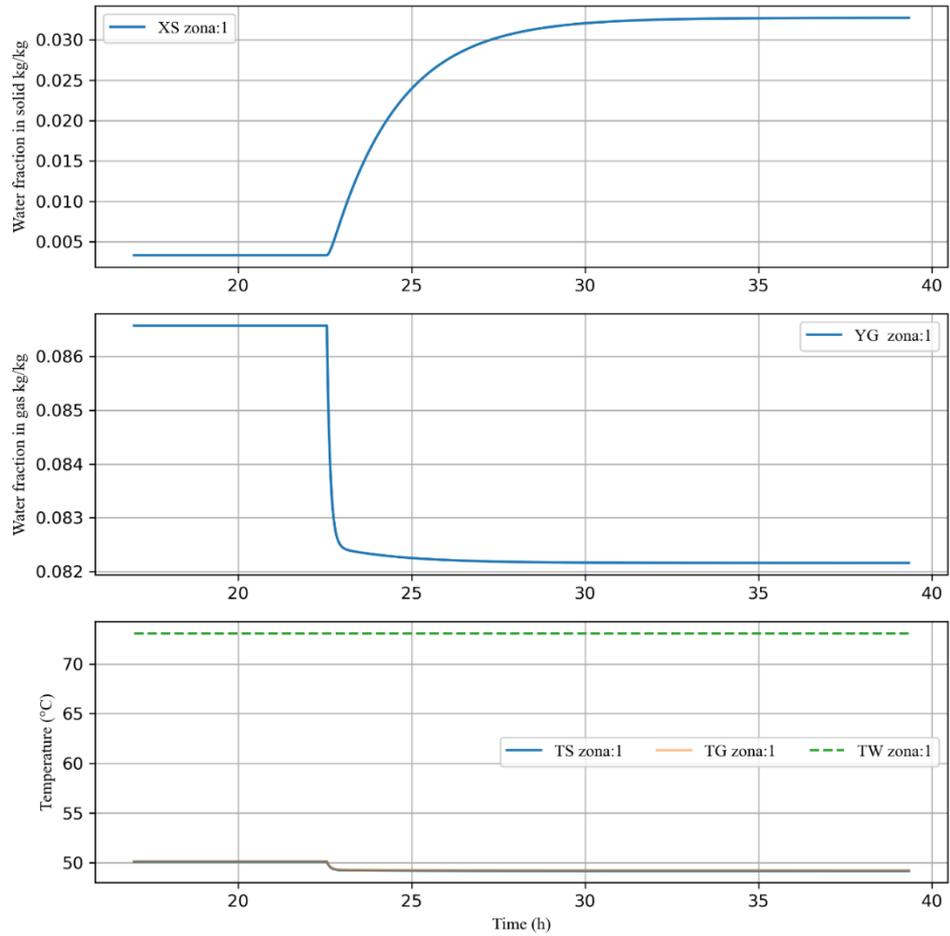
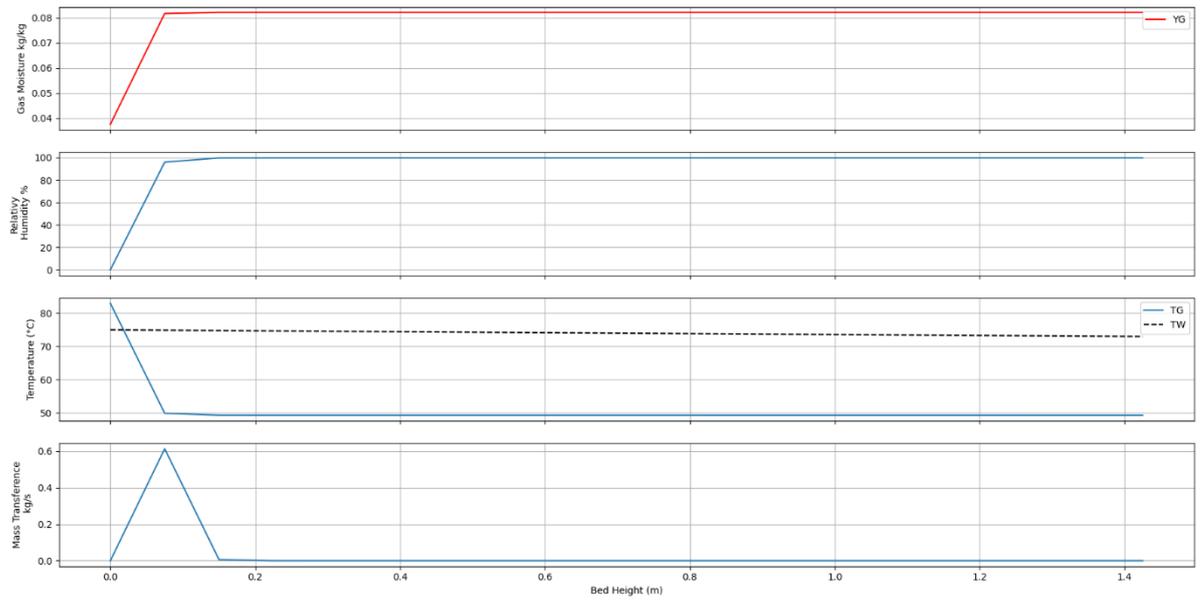


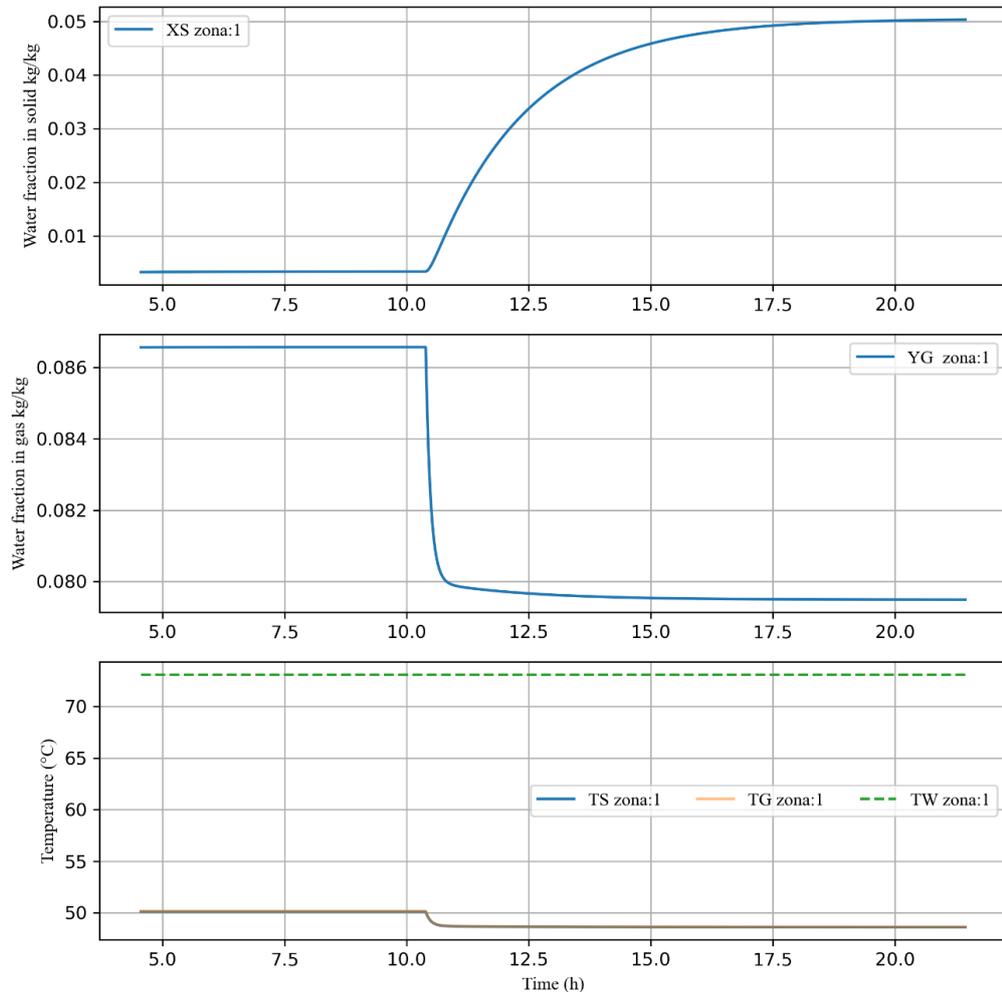
Figura 22 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -10°C sobre a temperatura do ar quente.



Variante (IV):

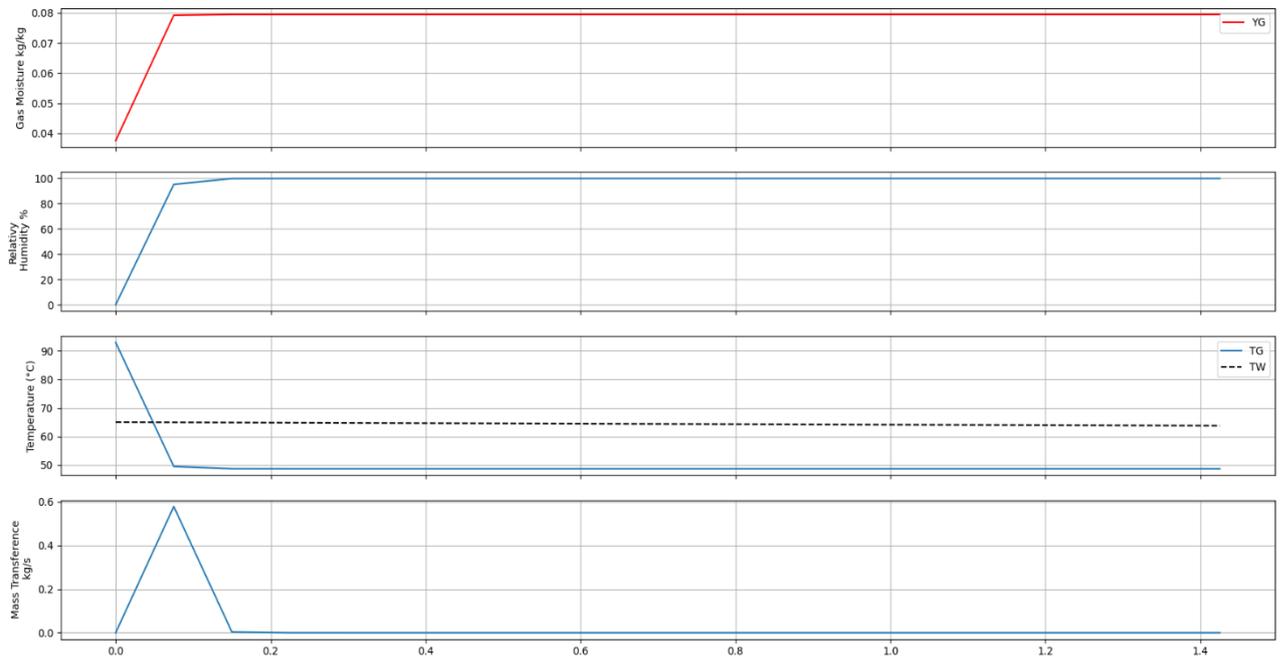
- **Decréscimo de 10°C na temperatura da água quente:**

Figura 23 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando -10°C sobre a temperatura da água quente.



Com a diminuição da temperatura da água de aquecimento, menor será a energia transferida para o leito. Com uma quantidade menor de energia oriunda da serpentina o leito tende a diminuir a temperatura o que diminui a eficiência da secagem devido aos fatores comentados no item Variante (I). Outra observação que se pode inferir da análise do gráfico é processo parece ser mais sensível a temperatura da água quente que a do ar. Isso se comprovará adiante na análise do ganho do processo.

Figura 24 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -10°C sobre a temperatura da água quente.



Variante (V):

- **Acréscimo de 10% na umidade da alimentação:**

Figura 25 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando +10% sobre a umidade de alimentação.

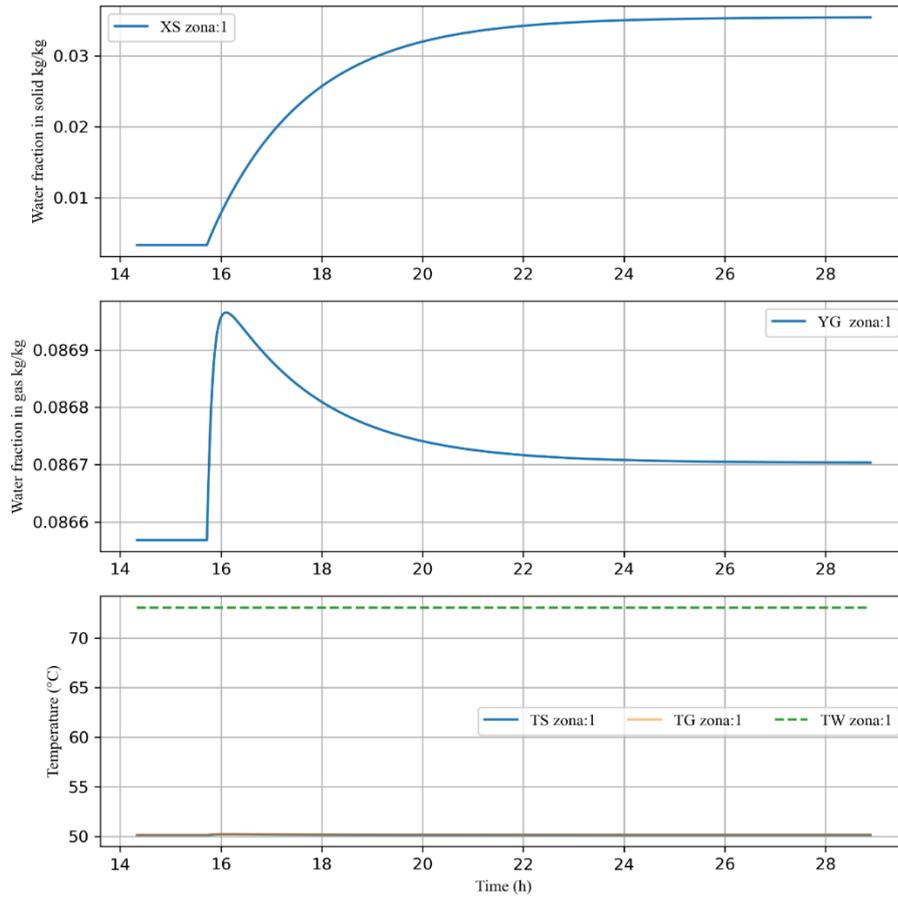
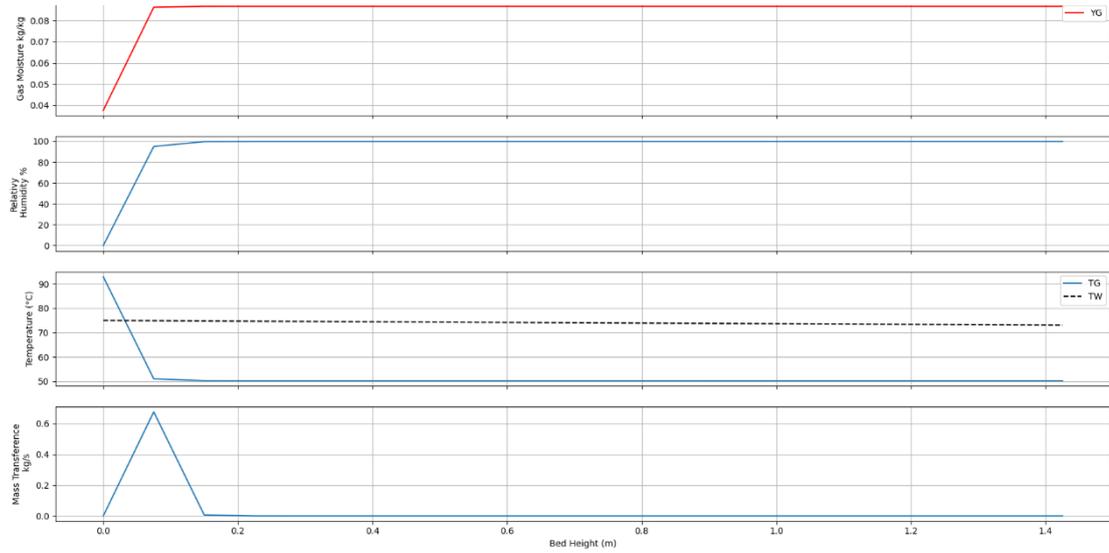


Figura 26 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando +10% sobre a umidade de alimentação



Variante (VI):

- **Decréscimo de 10% na vazão de ar quente:**

Figura 27 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando -10% sobre a vazão de ar quente.

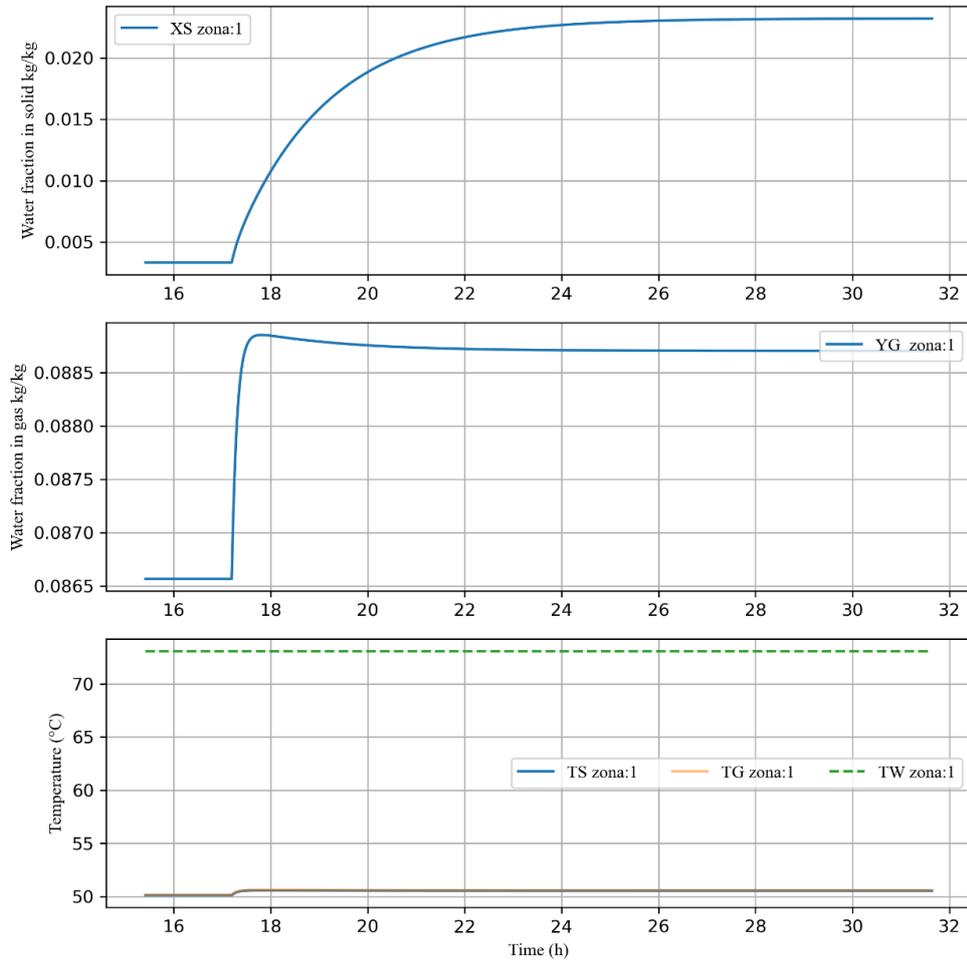
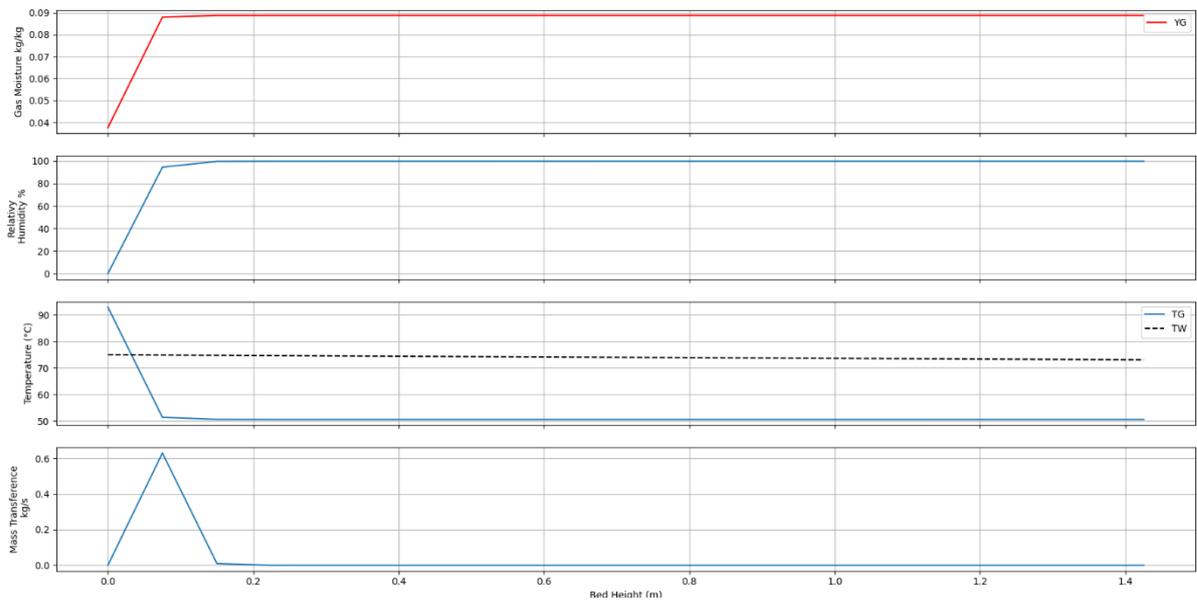


Figura 28 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -10% sobre a vazão de ar quente.



Variante (VII):

- **Decréscimo de 20% na vazão de água quente:**

Figura 29 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no tempo, considerando -20% sobre a vazão de água quente.

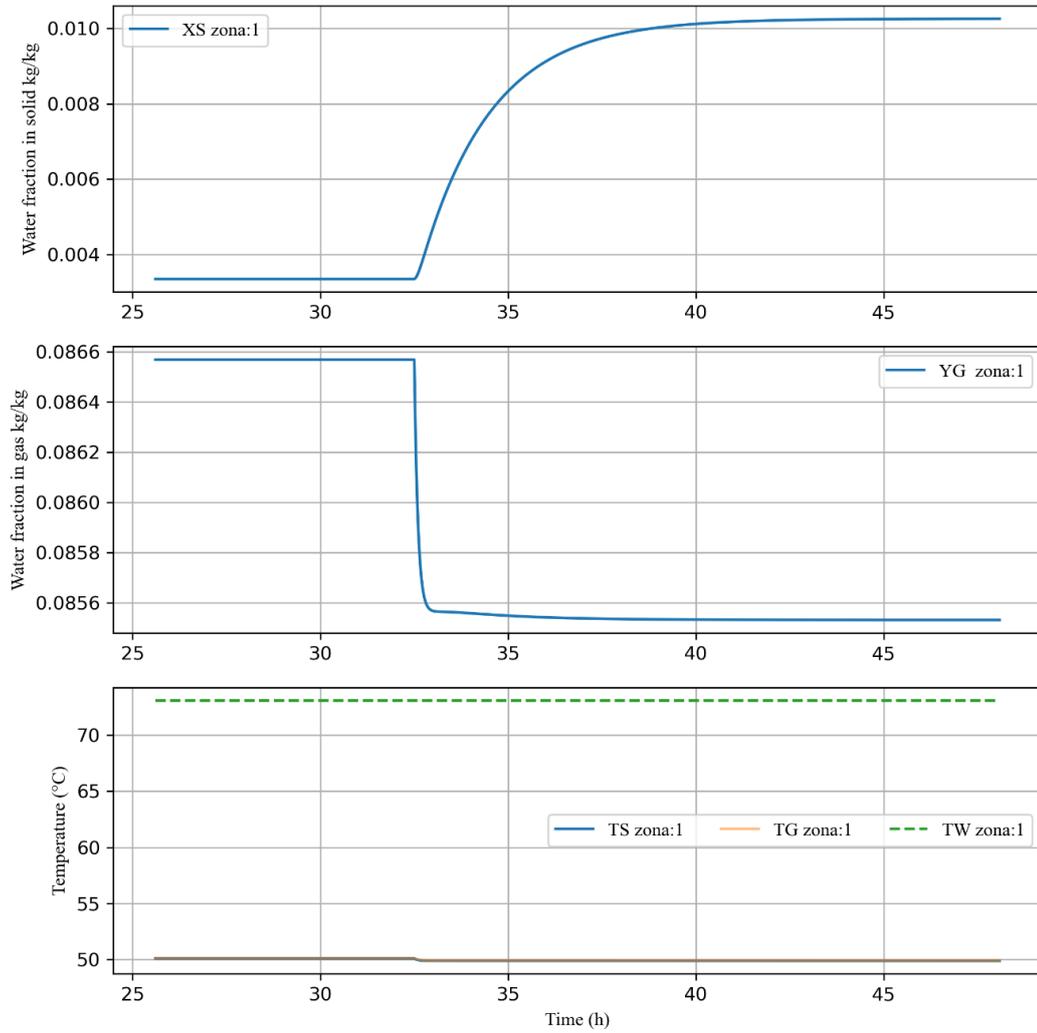
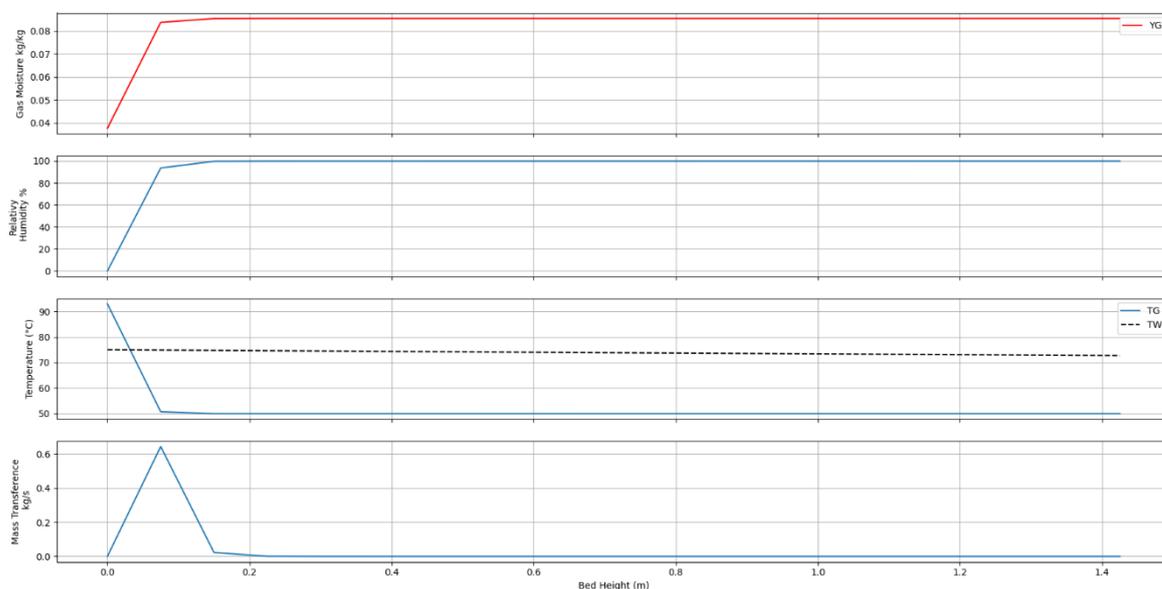


Figura 30 - Perfis de umidade e temperatura do gás e perfil de temperatura da água quente no espaço, e taxa de transferência de massa e de calor considerando -20% sobre a vazão de água quente.



Pode-se observar que, quando foram aplicados os distúrbios em degrau (-10°C) na temperatura de água quente (T_{Wi}), com 10h30min de processo, houve mudança na temperatura do leito e do gás (Figura 24).

Além disso, também foram observadas mudanças significativas quanto à mudança na carga de PVC, já que a temperatura do leito tende a cair com uma quantidade maior de resina sendo carregada ao secador, e vice-versa (Figura 18).

Ademais, analogamente à temperatura da água quente, foram observadas mudanças nas temperaturas do leito e do gás, quando se aplicou perturbações à temperatura do gás (T_{G0}).

A Tabela 1 disposta abaixo mostra os valores das variáveis quando aplicadas as perturbações. As análises dessas respostas dinâmicas, como desejado, apresentaram aderências aos dados operacionais da planta.

Tabela 1- Resultados obtidos após os distúrbios em degrau aplicados.

Variáveis de saída	Caso de Referência	Variante (I)	Variante (II)	Variante (III)	Variante (IV)	Variante (V)	Variante (VI)	Variante (VII)
X_s [kg/kg]	0,003	0,032	0,0112	0,035	0,023	0,003	0,010	0,050
T_s [$^{\circ}\text{C}$]	50,1	50,1	49,85	51,13	50,53	50,1	49,88	48,59
Y_G [kg/kg]	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,085	0,079
Umidade relativa	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

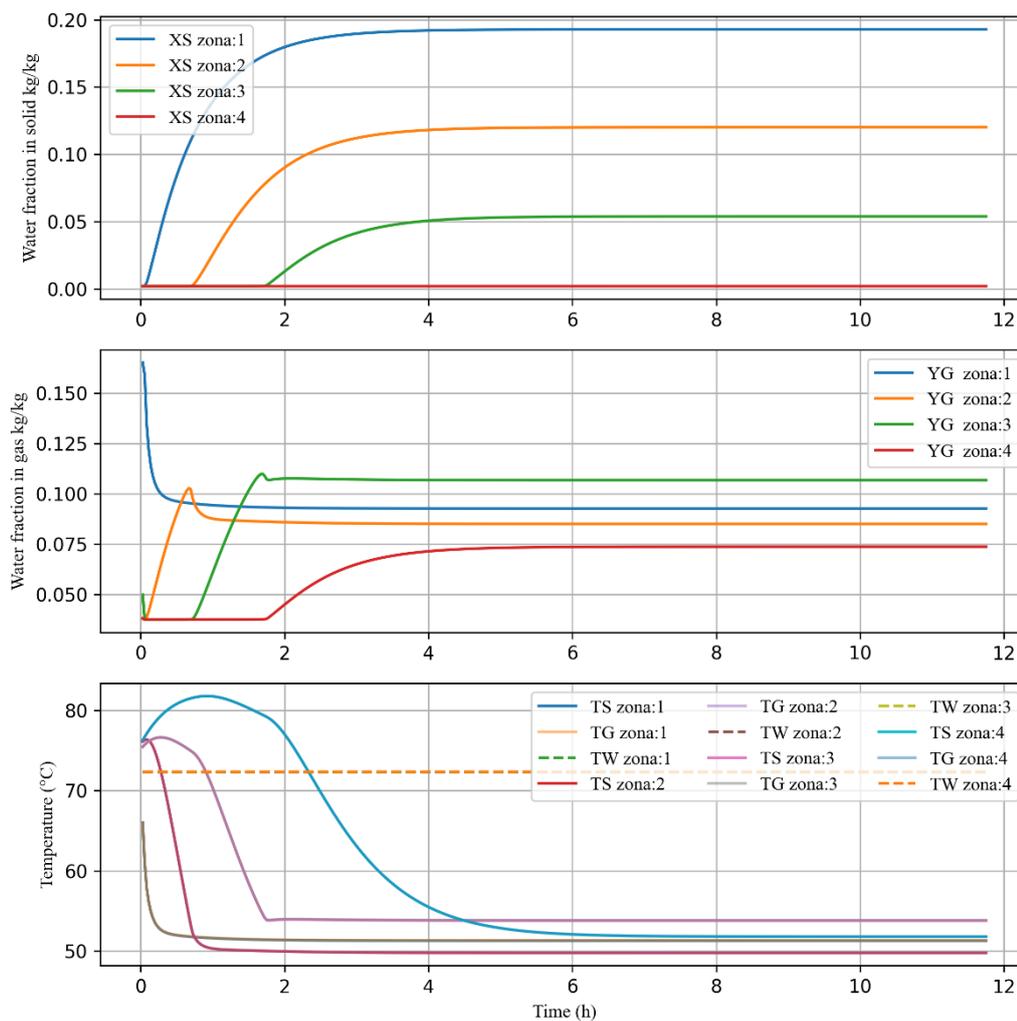
5.3. Simulações realizadas para múltiplas zonas

Foi simulado um caso de referência com valores aleatórios:

- $F_S=7,0$ t/h
- $X_{SF}=0,33$
- $F_G=30$ t/h
- $Y_{G0}=3,757e-2$
- $Q_w=120$ m³/h
- $T_{Wi}=72,2$ °C
- $T_{G0}=87,7$ °C
- $T_{SF}=58$ °C
- $h=1,0$ metros

As variáveis de saída relevantes foram a umidade da partícula (X_S), umidade do gás (Y_G), temperatura do gás e do leito (T_G e T_S) e temperatura da água (T_W), umidade de equilíbrio (Y_G^*) e umidade relativa. Para inicialização, foi atribuída umidade do leito de 0,01 kg/kg. Para o caso de referência, observa-se o comportamento dinâmico apresentado nas figuras seguintes.

Figura 31 – Caso de referência.

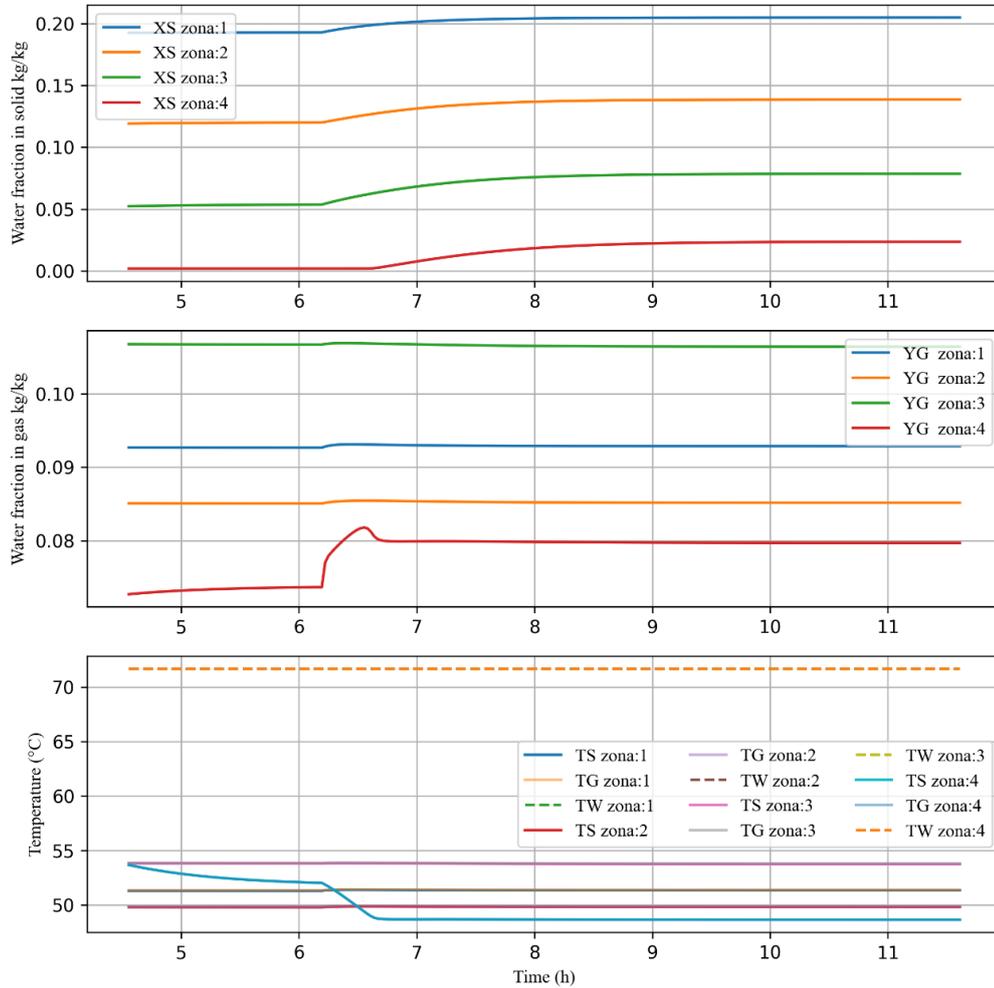


Tomando a simulação de referência, foram introduzidos distúrbios após ser atingida a condição estável e observados os efeitos.

Variante (I):

- **Acréscimo de 10% na carga de PVC:**

Figura 32- Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na carga de PVC.

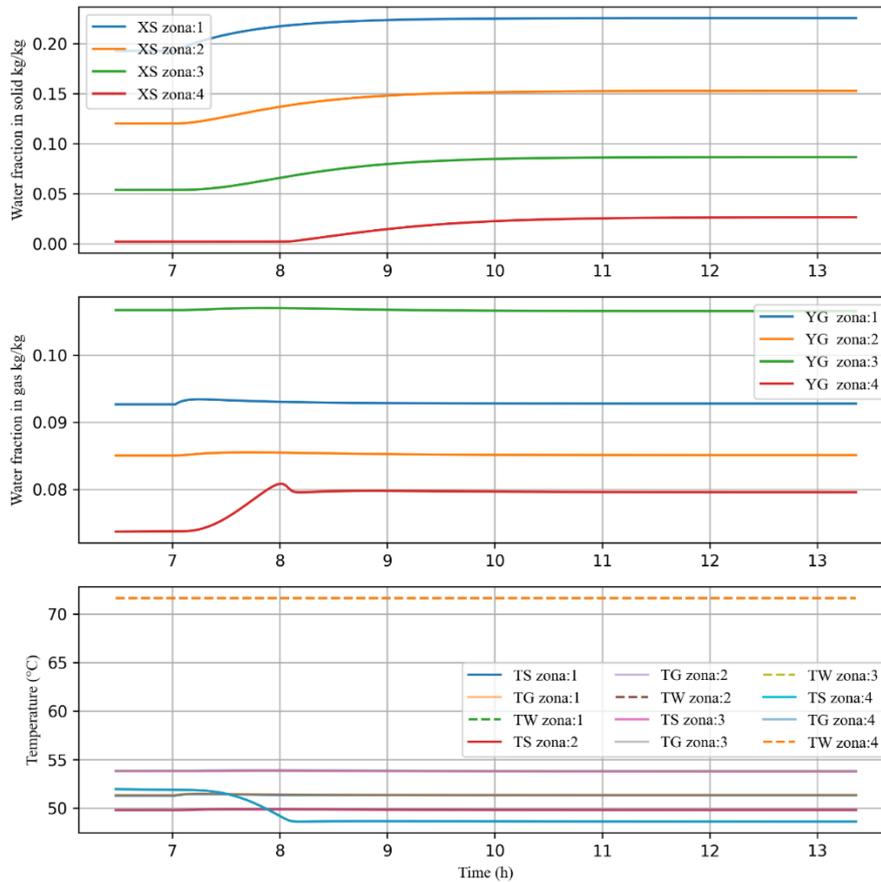


É possível observar na Figura 33 que o aumento na carga de PVC resulta em uma diminuição na temperatura do leito da última zona, bem como de umidade do leito em todas as zonas.

Variante (II):

- **Acréscimo de 10% na umidade da alimentação:**

Figura 33 - Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na umidade da alimentação.

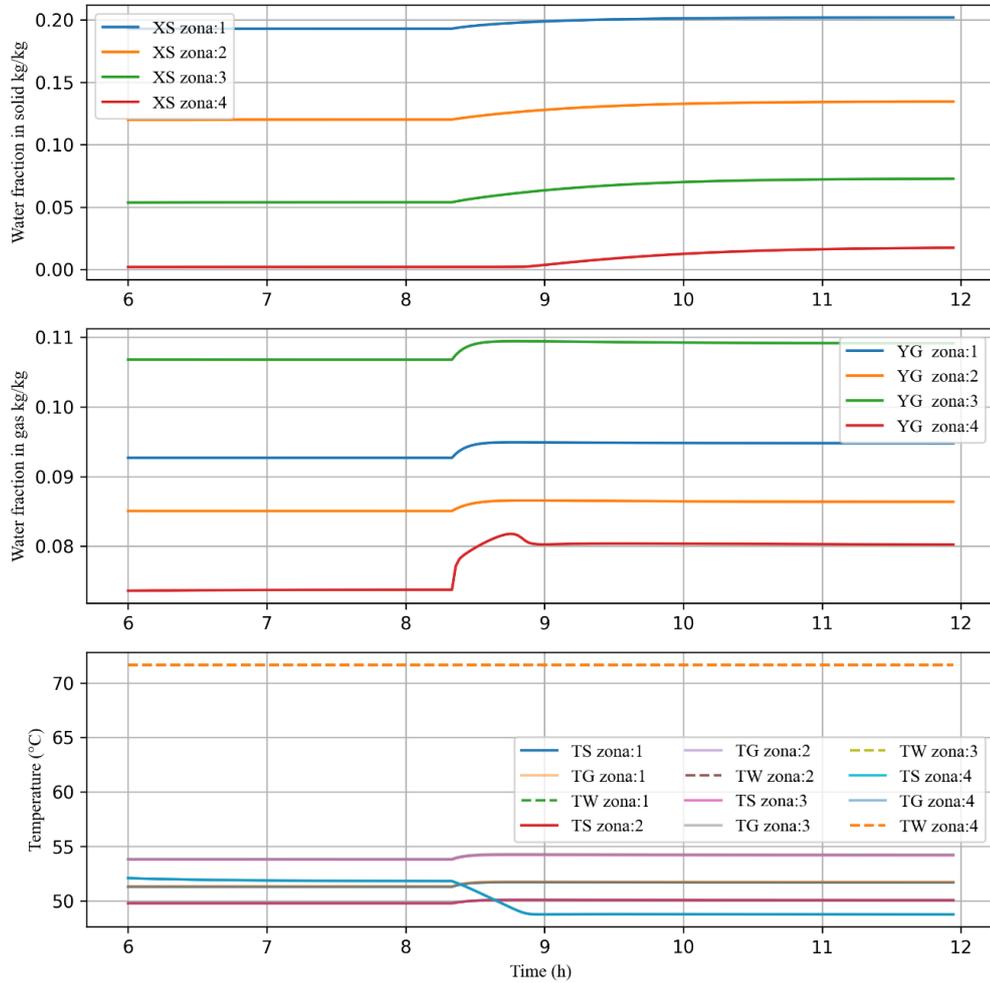


O aumento de umidade no bolo úmido altera a umidade do leito, e conseqüentemente, diminui a temperatura do leito na última zona, visto que é possível observar esse comportamento semelhante quando se introduz um acréscimo na carga de PVC.

Variante (III):

- **Decréscimo de 10% na vazão de ar:**

Figura 34- Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na vazão de ar.

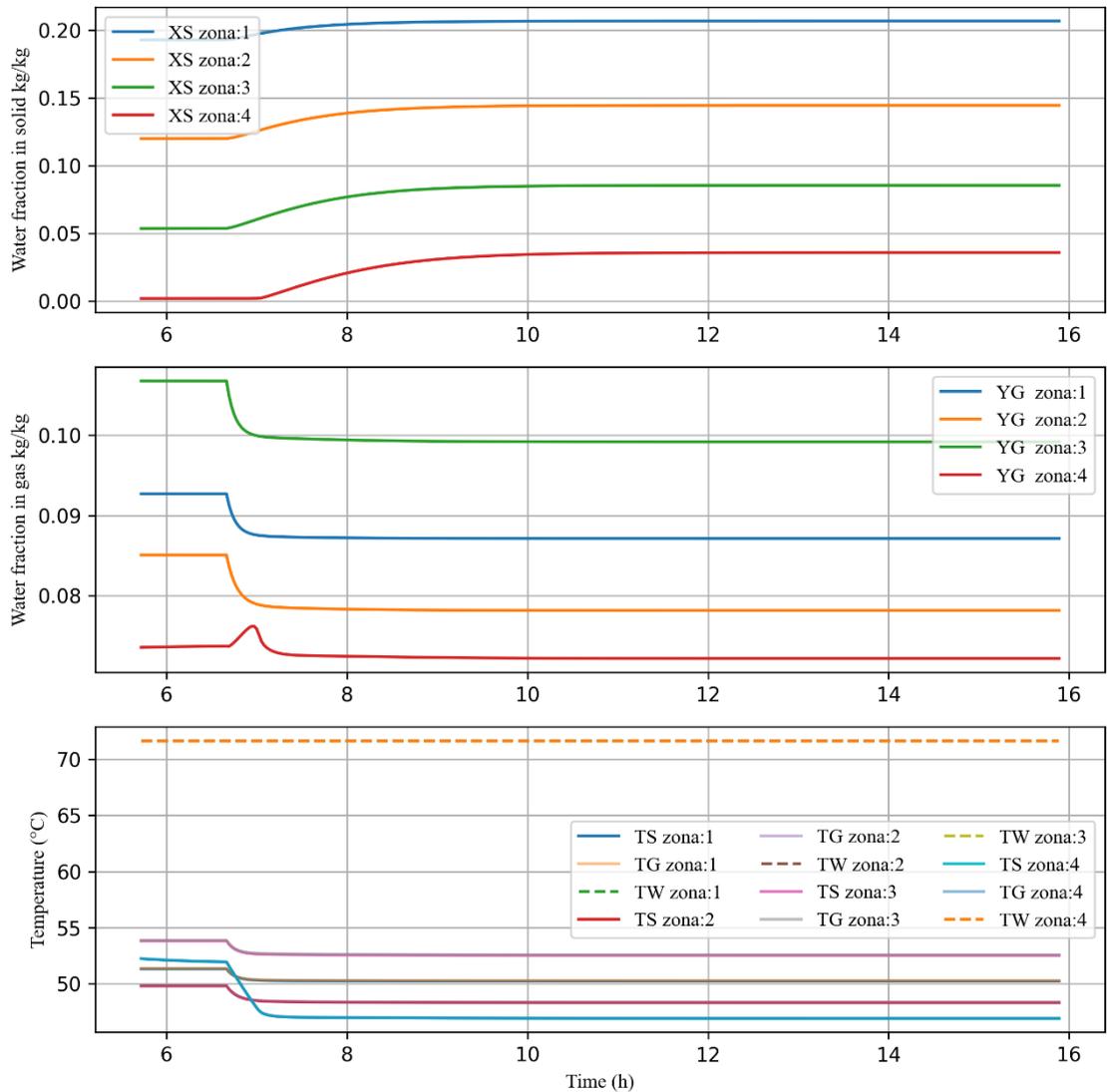


É importante salientar que a distribuição da vazão de ar nas zonas é proporcional a área de tela do secador em questão, já que atualmente não há uma medição precisa de vazão.

Variante (IV):

- Decréscimo de 10°C na temperatura do ar:

Figura 35 - Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na temperatura do ar.

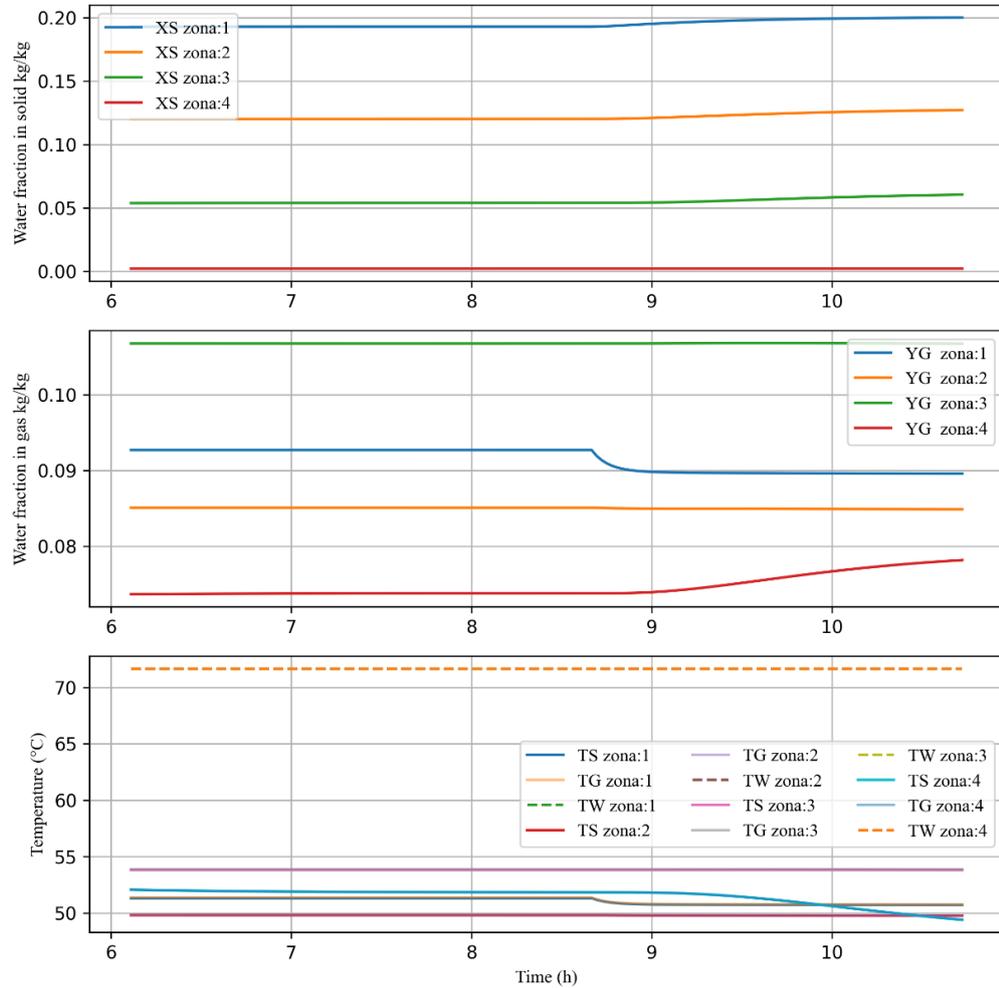


É possível observar que houve um aumento significativo na umidade do leito, bem como uma diminuição nas temperaturas das quatro zonas.

Variante (V):

- Decréscimo de 10°C na temperatura de entrada do bolo úmido:

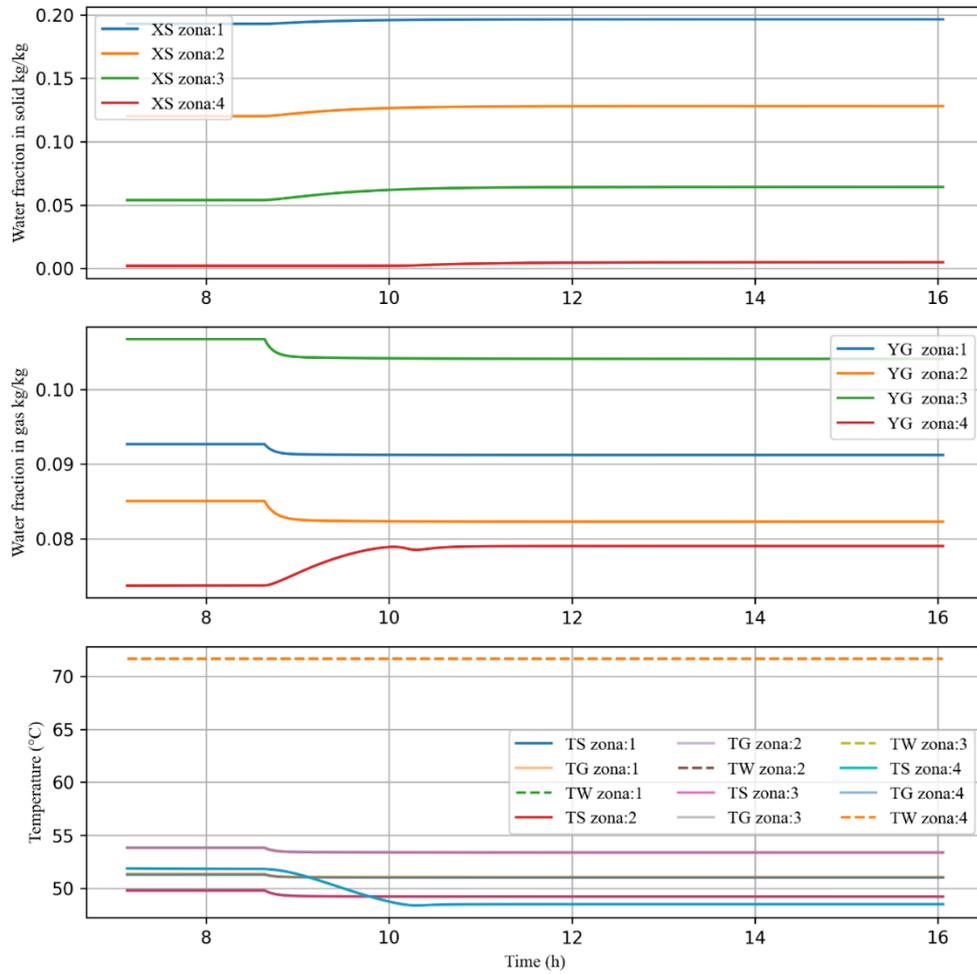
Figura 36- Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na entrada do bolo úmido.



Variante (VI):

- **Decréscimo de 20% na vazão de água quente:**

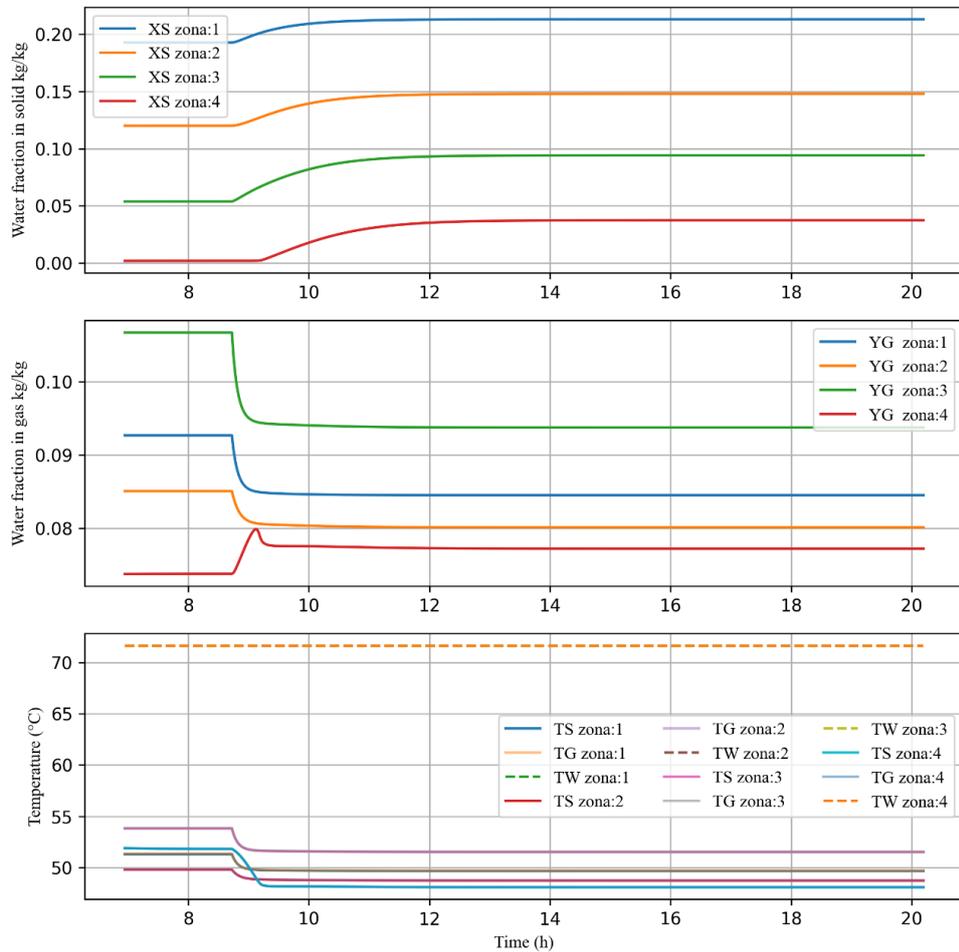
Figura 37 - Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na vazão de água quente.



Variante (VII):

- Decréscimo de -10°C na temperatura da água quente:

Figura 38 - Efeitos nas variáveis de output com distúrbio em degrau na temperatura da água quente.



É possível observar os efeitos na temperatura do leito em todas as zonas, bem como o aumento da umidade do leito.

Comparando-se os dois modelos, foi possível notar que o modelo adaptado para múltiplas zonas se aproximou mais da realidade, já que o secador analisado possui quatro zonas. Além disso, com o modelo de múltiplas zonas foi possível comparar as temperaturas dos termopares que estão localizados nas zonas do secador com os valores simulados, bem como analisar mais detalhadamente a dinâmica do processo em cada zona.

5.4. Constante de tempo e ganho

Para verificar a sensibilidade das variáveis, foram calculadas as constantes de tempo, ganho e tempo morto. A partir do caso de referência, foi aplicado distúrbios e analisado os efeitos sobre as variáveis de processo. A Tabela 2 abaixo mostra os valores calculados de constante de tempo e ganho.

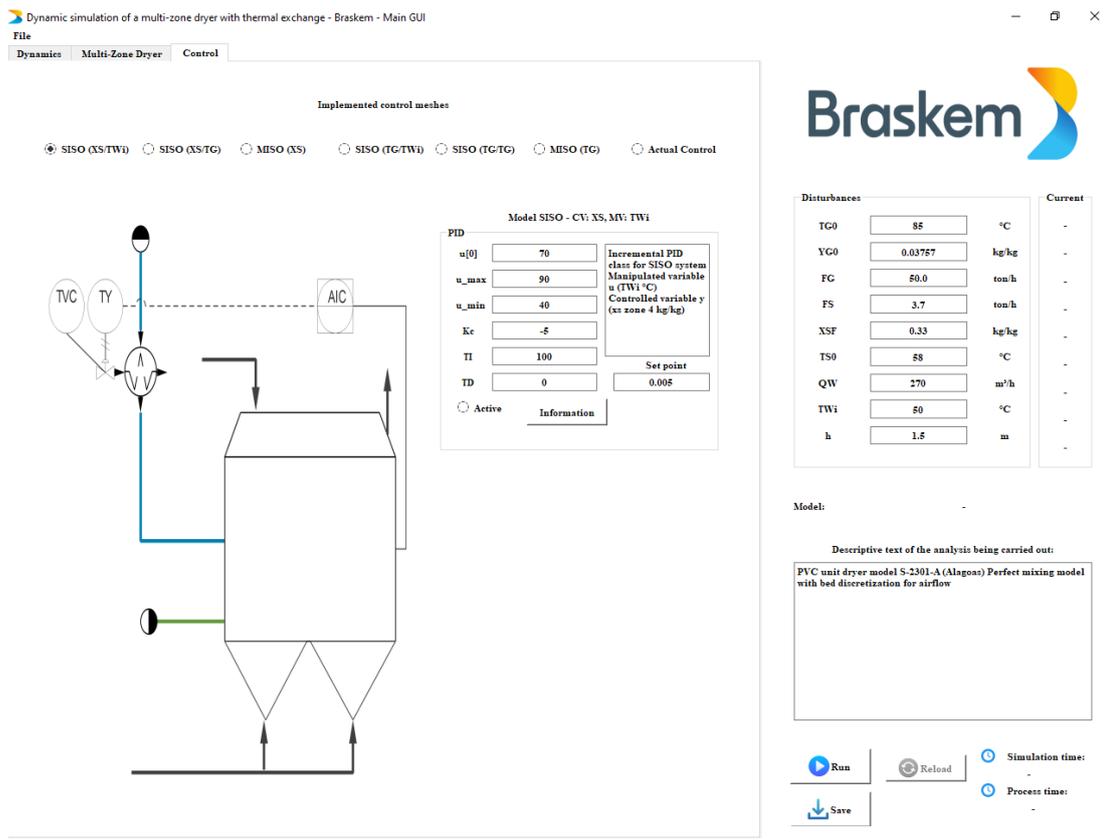
Tabela 2 – Avaliação da dinâmica do processo.

Var. medida	Var. manipulada	Distúrbio (degrau)	Ganho (K%)	Unidade do K	τ (min)	Tempo morto (min)
XS 4ª- zona (kg/kg)	FS (ton/h)	10%	56	kg/kg . (ton/h)-1	68	0
XS 4ª- zona (kg/kg)	TSF (°C)	-10°C	-9	kg/kg/ °C	110	43
XS 4ª- zona (kg/kg)	XSF (kg/kg)	10%	64	-	106	45
XS 4ª- zona (kg/kg)	FG (ton/h)	-10%	-48	kg/kg. (ton/h)-1	74	0
XS 4ª- zona (kg/kg)	TG0 (°C)	-10°C	-74	kg/kg/ °C	80	0
XS 4ª- zona (kg/kg)	QW (m3/h)	-20%	-3	kg/kg.(m3/h)-1	55	0
XS 4ª- zona (kg/kg)	TwI (°C)	-10°C	-41	kg/kg/ °C	98	0

A constante de tempo foi definida como sendo o tempo que se leva para um instrumento alcançar 63,2% de resposta estabilizada correspondente ao estímulo função degrau. É possível observar que as variáveis que contém maior ganho é a vazão de PVC, unidade do bolo úmido, vazão de ar, temperatura de ar quente e temperatura de água quente. Além do que as constantes de tempo são muito altas, visto que isso comprova o que é visto na realidade, a exemplo disso, quando operadores modificam a temperatura de água quente ou do ar, “sentem” o efeito depois de horas. As constantes de tempo altas e ganhos altos dificultam o controle do secador.

Foi implementado controle PID Incremental, como pode ser observado na Figura 40. Na aba “Control”, o usuário pode definir os parâmetros de controle. Ação do controle se mostrou lenta devido à dinâmica do processo.

Figura 39 – Aba com implementação de controle PID



6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Com a análise do processo estudado foi possível observar que as variáveis operacionais desempenham um papel fundamental na eficiência da secagem. As variáveis como a temperaturas da água de aquecimento e do ar são variáveis fundamentais para se analisar e estabelecer regimes de operação e implementar estratégias de controle manual ou automático. Na simulação do processo observa-se que a dinâmica do equipamento, devido a suas dimensões e aos fenômenos que nele ocorrem, é bastante lento. Esse tempo requerido para se observar mudanças significativas nas variáveis monitoradas do processo durante uma perturbação é fator desafiador para uma boa operação. Neste sentido, o modelo aqui desenvolvido, com similaridade significativa em termos de dinâmica com o processo real, atingiu o objetivo de simular o equipamento em um ambiente mais seguro. Além disso, com a ferramenta

desenvolvida pode-se estudar a dinâmica do equipamento frente as mudanças de condições operacionais e a implementar/analisar estratégia de controle clássico.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, seguindo a metodologia do presente trabalho, as seguintes sugestões podem ser abordadas:

- Aplicar controle avançado;
- Construir uma planta em escala de bancada para validar o modelo e testar o controlador;
- Aplicar métodos de sintonia para processos com constantes de tempo longas.

REFERÊNCIAS

- AMAZON WEB SERVICES. **O que é Python?** Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/python/>. Acesso em: 21 de maio de 2023.
- Cython. (2023). **Cython Documentation**. Retrieved from <https://cython.readthedocs.io/en/latest/>
- Fluidized bed - THERMOPEDIA*. (2010).
- Gagnon, F., Bouchard, J., Desbiens, A., Poulin, É., & Lapointe-Garant, P. P. (2021). **A dynamic simulation model of a continuous horizontal fluidized bed dryer**. *Chemical Engineering Science*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116258>
- H. Groenewold, E. Tsotsas, *Chem. Eng. Sci.* **2007**, 62, 481.
- J. C. C. S. Pinto e P. L. C. Lage - Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, 2024. **Método das Diferenças Finitas – Capítulo 3**. Disponível em https://lacoι.ufba.br/imagens_Lacoι/docs_pdf/7diferenciaconumerica.pdf
- JUNIOR, A. R.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W. *Tecnologia do PVC*. São Paulo: ProEditores Associados Ltda., 2006.
- L. A. Calçada, G. Massarani, *J. Porous Media* **2002**, 5 (2), 123.
- M. R. Assari, H. Basirat Tabrizi, M. Saffar-Avval, *Appl. Therm. Eng.* **2007**, 27, 422.
- O que é PVC. **Instituto Brasileiro do PVC**. Disponível em <https://pvc.org.br/o-que-e-pvc/>.
- Qt Documentation. (2023). **Qt Designer Manual**. Retrieved from <https://doc.qt.io/qt-5/qtdesigner-manual.html>
- Rodrigues Tacidelli, A., Tavernard Pereira Neto, A., Pereira Brito, R., Brandão de Araujo, A. C., Gonzaga Sales Vasconcelos, L., & Nicácio Alves, J. J. (2012). **Modeling and Simulation of Industrial PVC Drying in Fluidized Beds with Internal Heat Source**. *Chemical Engineering and Technology*, 35(12), 2107–2119. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100713>
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle III, F. J. (n.d.). *Process Dynamics and Control Fourth Edition*.
- Secchi, A. R. (1995). *Modelagem e Simulação de Processos PARTE I: Introdução*.
- SILVA, Jéssica Brito da. **Modelagem e simulação de uma coluna de destilação usando linguagem python**. 2023.