

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA

ESTÁGIO CURRICULAR OBRIGATÓRIO

**AVALIAÇÃO DE MÁQUINA SECADORA DA POLPA DA
CELULOSE UTILIZANDO SOFTWARE ASPEN PLUS**

Ian Ferreira Paulo

Campina Grande – PB
2025

Ian Ferreira Paulo

**AVALIAÇÃO DE MÁQUINA SECADORA DA POLPA DA
CELULOSE UTILIZANDO SOFTWARE ASPEN PLUS**

Estágio Curricular Obrigatório submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Química, do
Centro de Ciências e Tecnologia da
Universidade Federal de Campina Grande,
como requisito para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Brandão Ramos
Supervisor de Estágio: Prof. Dr. Luis Gonzaga Sales Vasconcelos

Ian Ferreira Paulo

**AVALIAÇÃO DE MÁQUINA SECADORA DA POLPA DA
CELULOSE UTILIZANDO SOFTWARE ASPEN PLUS**

BANCA EXAMINADORA

Orientador - Prof. Dr. Wagner Brandão Ramos

Prof. Dr. Luis Gonzaga Sales Vasconcelos

Msc. Vitor Renan Vitor Gama

AGRADECIMENTOS

Durante meu Trabalho de Conclusão de Curso coloquei muito carinho associado aos que muito batalharam ao meu lado ou deram algum nível de suporte a mim durante a graduação. Se for do seu interesse saber quem estes possam ter sido, pode procurar pela minha referência nominal, sobre aquele assunto que tanto sou lembrado por uns e outros.

No entanto, eu prometi a mim mesmo que você seria o ponto final de tudo que envolvesse meus anos de graduação, então, cá estamos. Tenho certeza que mãinha só foi forte por todo mundo nesses últimos anos, por sua causa, minha melhor e maior advogada, que sempre foi forte por ela. Quanto a essa mania incansável de ter tantas coleções e acumular tantas “coisinhas” que todos nesta família herdamos, de certo veio de alguém e nós carregamos esse pedaço de ti conosco.

Aconteceu tanta coisa desde 30/03/2022, sabia? Queria que você tivesse tido a chance de ver com teus próprios olhos e ouvir com teus ouvidos cada parcela disso, frágil coração, para além de apenas experienciar orgulho pela boca dos outros. Pois, independente das conquistas serem nossas, elas sempre foram dedicadas a você.

O rumo que a vida tomou foi algo que gerou uma ausência minha, mas, eu tinha a melhor das intenções trilhando essa estrada chamada Engenharia Química. Espero de coração que, esteja onde estiver, tenha a noção que um pedaço de todos os meus méritos será sempre seu.

Gostaria que meu diploma saísse com seu nome juntamente ao meu, mas, como não poderei ter isso, dedico desta forma como singela homenagem e saudosa lembrança este trabalho em memória de Divanice Marques (29/05/1945 - 30/03/2022).

“Um dia eu devo voltar. Sim, um dia eu devo voltar. Até lá, espero que não tenham arrependimentos, tristezas e muito menos aflições. Sigam firmes com todas as suas crenças e decisões... ah, sim! E, por favor, me mostrem que eu não errei ao escolher as minhas.”

- William Hartnell

RESUMO

Este relatório apresenta a avaliação do desempenho de uma máquina secadora da polpa de celulose utilizando o software Aspen Plus. O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Referência em Controle e Automação (LARCA) da Universidade Federal de Campina Grande como parte do estágio curricular obrigatório do curso de Engenharia Química. A pesquisa teve como objetivo modelar, simular e otimizar o processo de secagem da polpa de celulose, validando os resultados com dados operacionais reais. Foram adotadas metodologias de modelagem computacional, análise de dados e ajuste de parâmetros para desenvolver um modelo que representasse adequadamente o comportamento do equipamento. Além disso, diferentes cenários operacionais foram analisados a fim de identificar oportunidades de otimização do processo e melhoria da eficiência energética. Os resultados indicaram que a modelagem foi capaz de reproduzir satisfatoriamente o processo real, permitindo inferências sobre possíveis melhorias operacionais. Contudo, algumas limitações relacionadas à convergência do modelo em determinados cenários foram identificadas, sugerindo a necessidade de estudos futuros para avaliação em regime dinâmico.

Palavras-chave: Secagem da celulose; Simulação de processos; Aspen Plus; Engenharia Química; Modelagem computacional; Otimização de processos; Eficiência energética; Transferência de calor; Controle de processos.

ABSTRACT

This report presents the performance evaluation of a cellulose pulp drying machine using the Aspen Plus software. The study was conducted at the Reference Laboratory for Control and Automation (LARCA) of the Federal University of Campina Grande as part of the mandatory internship for the Chemical Engineering undergraduate program. The research aimed to model, simulate, and optimize the cellulose pulp drying process, validating the results with real operational data. Computational modeling methodologies, data analysis, and parameter adjustment were applied to develop a model that accurately represented the equipment's behavior. Additionally, different operational scenarios were analyzed to identify opportunities for process optimization and energy efficiency improvement. The results indicated that the modeling satisfactorily reproduced the real process, enabling inferences about potential operational improvements. However, some limitations related to model convergence in specific scenarios were identified, suggesting the need for future studies to assess dynamic regime performance.

Keywords: Cellulose drying. Process simulation. Aspen Plus. Chemical engineering. Computational modeling. Process optimization. Energy efficiency. Heat transfer. Process control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de Secadora Convectiva	13
Figura 2: Esquema de máquina secadora com sistema de Heat Recovery	14
Figura 3: Interface do software Aspen Plus.....	15
Figura 4: Máquina secadora da polpa de celulose	18
Figura 5: Máquina secadora da polpa de celulose	19
Figura 6: Bloco de secagem em simulador comercial Aspen Plus	20
Figura 7: Processo de pré-aquecimento do ar seco	22
Figura 8: Representação da recirculação de ar na Máquina Secadora	22
Figura 9: Representação do processo de secagem da polpa de celulose completo	23
Figura 10: Parâmetros e especificações de um dos blocos de secadora	24
Figura 11: Aba das especificações de transferência de Massa e Calor	25

Sumário

1. Introdução.....	10
2. Revisão Bibliográfica.....	12
2.1. Celulose	12
2.2. Secagem.....	12
2.3. Aspen Plus	14
2.4. Ciências de Dados	16
3. Objetivos	17
3.1. Objetivos Gerais.....	17
3.2. Objetivos Específicos	17
4. Atividades Desnvolvidas.....	18
4.1. Máquina Secadora.....	18
4.2. Base de Dados.....	20
4.3. Modelagem em Aspen Plus	20
4.4. Hierarquias.....	21
4.5. Simulação	23
4.6. Validação do Modelo	23
4.7. Avaliação de Cenários Operacionais.....	25
5. Conclusão	26
Referências	27

1. Introdução

O relatório a seguir apresenta, de forma sucinta, as atividades realizadas durante a disciplina de estágio integrado, que é um requisito para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande.

O estágio foi realizado no Laboratório de Referência em Controle e Automação (LARCA), com o intuito de integralizar a carga horária para a obtenção do título de Bacharel e dar a possibilidade ao discente de realizar uma atividade teórico-prática, utilizando-se dos conhecimentos adquiridos durante a graduação.

Durante o estágio, as atividades foram orientadas e supervisionadas pelos Professores Prof. Dr. Wagner Brandão e Prof. Dr. Luis Gonzaga, respectivamente, ambos professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande.

As atividades foram realizadas dentro do LARCA ou Laboratório de Referência em Controle e Automação, um dos laboratórios de pesquisa englobados pela unidade acadêmica de Engenharia Química (UAEQ). Contando com uma equipe qualificada quem compõe o seu rol de professores e pesquisadores.

O LARCA tem foco no desenvolvimento de pesquisas voltadas para controle, modelagem, otimização e simulação de processos com o intuito de trazer soluções e inovações em diversas áreas, como a do aumento da eficiência energética ou melhora da produtividade de plantas e processos.

O laboratório dispõe de diversos recursos facilitadores para realização de atividades de desenvolvimento de novas tecnologias e visões acerca de processos industriais, como computadores de ponta que facilitam aos alunos que lá frequentam produzirem de forma eficiente trabalhos cada vez melhor elaborados acerca do assunto.

Diversas pesquisas com softwares cada vez mais inseridos no mercado vem sendo feitas pelo próprio LARCA. Além de softwares e linguagens gratuitas muito difundidas na academia e no mercado, o laboratório também disponibiliza para seus alunos diversas ferramentas e softwares da Aspen Tech, a exemplo, o Aspen Plus, Aspen HYSYS e Aspen Dynamics, para citar alguns.

O estágio em si foi dividido em cinco etapas, para que desta forma o aluno pudesse desenvolver seu conhecimento para poder realizar cada um dos passos de forma eficiente.

1. Na fase inicial do trabalho, foram definidos os objetivos principais que deveriam ser alcançados com esse trabalho, estipulando o que era de interesse desenvolver encima da problemática inicial, não ultrapassando o tempo definido para o período do estágio.
2. A partir disso, foi feito uma minuciosa pesquisa acerca do processo vigente, com diversas indicações por parte do Prof Dr. Wagner e Prof. Dr. Luis com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre o processo de secagem e as diversas formas propostas pela literatura para modelagem do processo. Somado a avaliação feita pelo aluno dos dados operacionais a ele entregue, com diversas informações sobre a fornecedora de equipamentos como o de interesse avaliar.
3. Aprofundamento e familiarização com a ferramenta Aspen Plus com o intuito de saber utilizar todas as suas funcionalidades ao máximo para melhorar avaliação e otimização do processo analisado.
4. Modelagem do processo no software, avaliação dos resultados e se os mesmos se coincidem com a realidade, para assim poder validar o modelo com o auxílio dos dados operacionais fornecidos. Otimizando a operação do processo através dos dados coletados.
5. Avaliar diversos cenários operacionais distintos para entender se a simulação conseguia atingir e se adequar a diversas situações que o processo poderia perpassar, desta forma, deixando assim a simulação mais robusta e com uma faixa de possibilidades de avaliação superior.

Essas etapas foram planejadas pelo supervisor e orientador em conjunto com o discente, a fim de que este tivesse uma experiência teórico-prática com diversas vertentes de conhecimento adquirido durante os anos de graduação fossem colocados em prática.

Por fim, o objetivo deste relatório é fornecer informações acerca das atividades desenvolvidas durante o período do estágio integrado e descrever as soluções encontradas para otimizar um processo de secagem da polpa de celulose, utilizando-se de técnicas que melhorem a eficiência térmica do processo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Celulose

A Celulose é um polímero linear de glicose de alta massa molecular formado de ligações β 1,4 glicosídicas – que não é solúvel em água – sendo o principal componente da parede celular da biomassa vegetal. A molécula pode ter áreas com configuração ordenada, rígida e inflexível em sua estrutura e outras áreas de estruturas flexíveis (Castro, 2009).

Ao produzir papel, a polpa da celulose é a principal matéria-prima, sendo ela fibrosa e oriunda principalmente de vegetais. Como produto, o termo “celulose” pode ser definido como o produto oriundo de processos químicos e/ou mecânicos que têm por objetivo individualizar fibras vegetais. (da Silva Júnior e Brito, 2008).

No Brasil, a principal matéria-prima para produção de celulose é o eucalipto. É um produto de alta exportação da indústria brasileira, tendo movimentado 13349 Gt no ano de 2017 (Juvenal e Mattos, 2002; Sanquetta et al., 2020)

A indústria de papel e celulose representa devida importância na economia brasileira. Em 2019, foram arrecadados aproximadamente US\$ 7,35 bilhões com a exportação da polpa de celulose, representando cerca de 21,2% do total mundial exportado (Observatory of Economic Complexity, The– OEC, 2020).

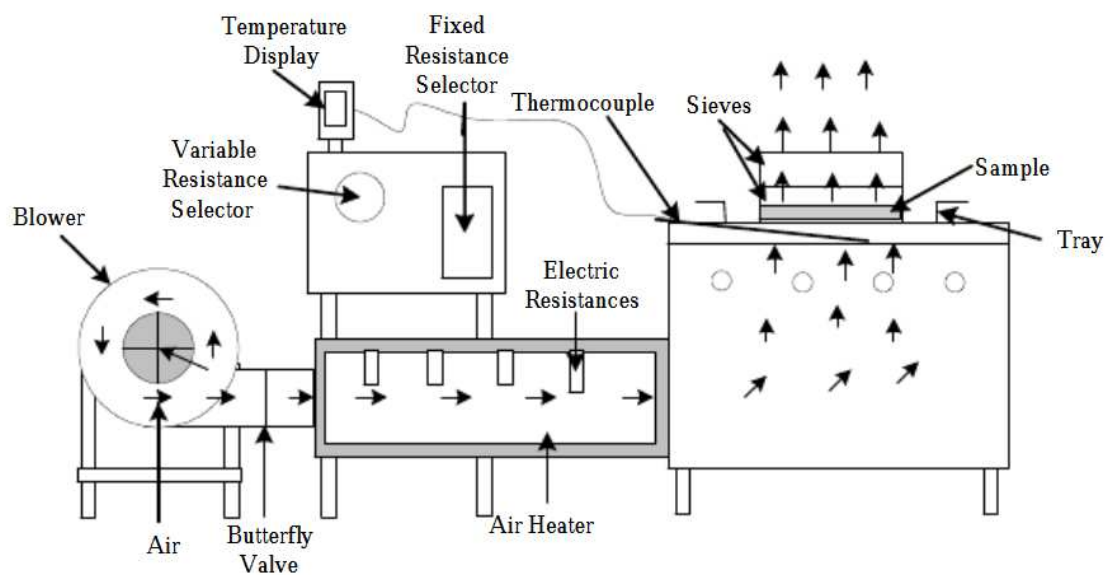
2.2. Secagem

Como uma operação unitária utilizada em larga escala, a secagem exerce um papel essencial em diversos processos industriais e ambientais envolvendo materiais com presença de líquidos, tais como: tintas, papel, têxteis, alimentícios, agrícolas, sendo fundamental obter o entendimento e o controle do processo a fim de minimizar o consumo de energia e/ou controlando as propriedades finais do material (Abdelouahab *et al.*, 2019).

De modo geral, o termo secagem refere-se à redução de quantidades de umidade em um sólido, isto é, de líquido por evaporação. Assim, operações simultâneas de calor e massa são realizadas para remover o teor de umidade, existindo a transferência de umidade de dentro do material para a superfície e da superfície para a atmosfera (Mujumdar, 2014; Onwude et al., 2016).

Assim sendo, a maioria dos métodos industriais de secagem são baseados na transferência de calor por convecção – como mostra o esquema da Figura 1 – a partir da utilização de um meio quente, o que geralmente exige uma considerável quantidade de energia, podendo aumentar os custos de produção associados (Pacheco *et al.*, 2011), haja vista que o calor latente de vaporização da água é consideravelmente alto e os produtos úmidos consomem uma pequena parcela da energia fornecida, especialmente se o equipamento não se encontra operando nas condições apropriadas (Aghbashlo, 2015).

Figura 1: Esquema de Secadora Convectiva



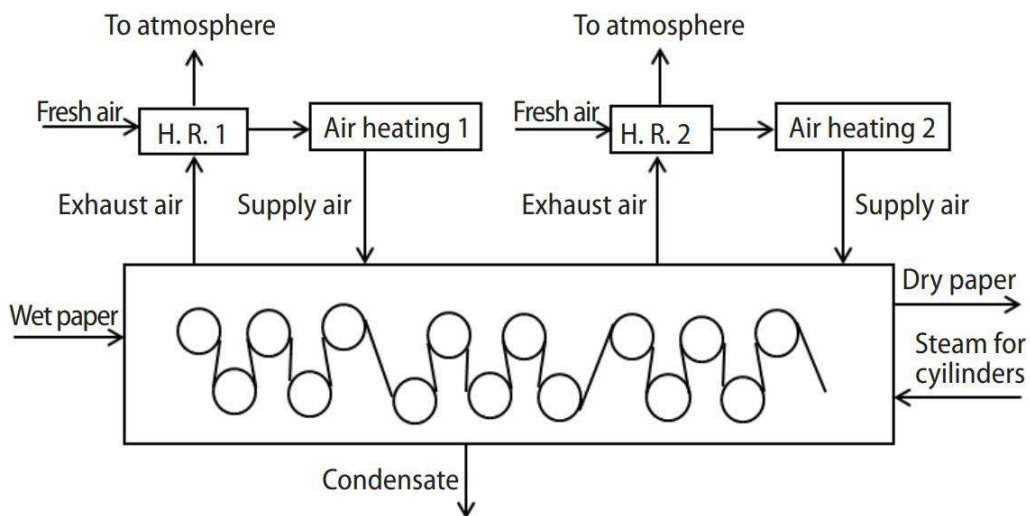
Fonte: Pacheco *et al.*, 2011

Através da cinética de secagem, a qual refere-se as mudanças do teor médio de umidade e temperatura média com o tempo, o controle dessas variáveis geralmente é realizado pela transferência de calor e umidade entre a superfície do material, o ambiente e a estrutura interna do material de secagem, isto é, são mudanças influenciadas significativamente pelos parâmetros do processo (Dinçer e Zamfirescu, 2016).

Processos industriais geram grandes quantidades de desperdício de calor, comumente perdidos para o ambiente. Devido a alta demanda de energia de processos, como o da secagem, há uma maior contribuição para emissões de gases de efeito estufa (JOUHARA e OLABI, 2018).

Uma saída para que tenha uma redução do consumo energético e emissão de gases é a recuperação térmica, reutilizando o calor gerado pelo próprio processo como forma de reaproveitar aquela energia que de outra forma seria desperdiçada (JOUHARA *et al.*, 2018). Como mostra a Figura 2, o esquema de processo sugerido por Ghodbanan, Alizadeh e Shafiei (2017) apresenta uma abordagem utilizando as tubulações de ar de exaustão para reaproveitar o calor, sendo essas tubulações ótimos dispositivos de transferência de calor passivo (CHAUDHRY, HUGHES, GHANI, 2012)

Figura 2: Esquema de máquina secadora com sistema de Heat Recovery



Fonte: Ghodbanan, Alizadeh e Shafiei, 2017

2.3. Aspen Plus

Desenho de um processo inicializa com o conceito de gerar um novo produto ou melhorar um dado produto. A avaliação do processo químico e possíveis matérias-primas para produção de dado produto – analisando juntamente a disponibilidade de recurso, o ambiente e a viabilidade econômica do processo – são as primeiras coisas a serem levadas em conta ao iniciar esse tipo de análise. (HAYDARY, 2018)

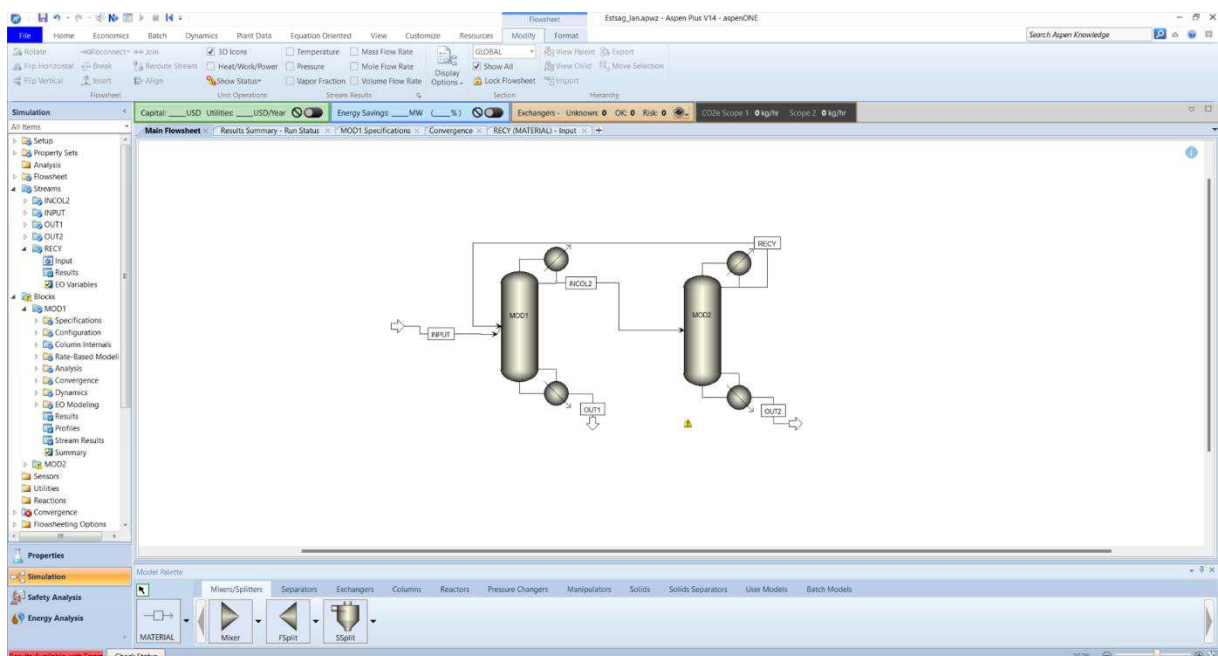
Várias ferramentas de simulação vêm sendo empregadas com o intuito de modelar, simular e otimizar processos de cunho mais complexo, auxiliando assim na resolução de sistemas como esses que tomariam muito tempo e esforço utilizando metodologias tradicionais de resolução.

A maior vantagem do Aspen Plus quando comparado a outros simuladores comerciais é a flexibilidade para testar diferentes configurações de processos, melhorando assim a visão

acerca dos diferentes cenários que podem ser influenciados por condições operacionais variáveis e determinar limitações do processo que essas condições podem vir a apresentar. (MUTLU e ZENG, 2020)

Processos que tipicamente teriam fluxogramas emaranhados que representam diversas entradas e saídas do sistema, como a separação de misturas que apresentam azeótropos tipicamente contém, utilizando de exemplo o estudo realizado por Qin *et al.* (2022), podem ser simplificados visualmente como apresenta a Figura 3 facilitando a interação do usuário com o processo.

Figura 3: Interface do software Aspen Plus



Fonte: Elaborada pelo autor

Processos de separação como o de retirada de umidade da celulose se beneficiam bastante dessa simplificação e alta performance para testes de cenários, devido a alta complexidade ao simularmos a separação de sólidos.

Desta forma, com uma interface de fácil compreensão, que melhora a experiência do usuário e facilita a execução do trabalho, o Aspen Plus se faz uma ferramenta muito útil para avaliação e otimização desse processo.

2.4. Ciências de Dados

É possível afirmar que a ciência de dados nada mais é que a extração de entendimento e discernimento sobre certo assunto, através de um conjunto de dados difuso (Grus, 2019). Nos tempos de hoje, com o crescente acesso a internet, houve um aumento considerável no registro de dados em diversos segmentos, hoje tornando cada vez mais comum o processo de monitoramento e catalogação dos dados gerados em procesos industriais.

Com o uso de monitoramento cada vez mais eficiente se tem uma melhor visão da probabilidade de quebra inesperada do equipamento, rastreio das operações realizadas e redução dos custos (LIU *et al.*, 2013). O sensoriamento se torna para aquele equipamento ou processo como os “olhos” e “ouvidos” para quem opera a sala de controle.

Combinando de forma astuta a matemática, a estatística, a ciência da computação e conhecimentos específicos sobre o campo de estudo de interesse, a ciência de dados faz-se um recurso valioso para uma nova compreensão de processos e setores de forma cada vez mais eficiente, auxiliando no processo de validação de modelos, dando uma percepção melhorada acerca do ajuste de parâmetros, provenientes de modelos baseados em dados (GARCIA; KNUUTILA, GU, 2017).

3. Objetivos

3.1. Objetivos Gerais

Simular e avaliar sistema de máquina secadora da polpa de celulose utilizando a ferramenta computacional Aspen Plus e entender variações de comportamento do sistema quando testado em diferentes cenários operacionais.

3.2. Objetivos Específicos

- Simular a operação de uma secadora convectiva de polpa de celulose utilizando o Software Aspen Plus;
- Validar modelo com dados operacionais da secadora;
- Avaliar cenários Operacionais.

4. Atividades Desnvolvidas

O estágio foi realizado em formato presencial na Universidade Federal de Campina Grande, utilizando-se dos recursos fornecidos pelo Laboratório de Referência em Controle e Automação para a execução das atividades propostas.

4.1. Máquina Secadora

O desenvolvimento da análise iniciou com o entendimento do sistema do processo, partindo do modelo de Ghodbanan, Alizadeh e Shafiei (2017), das informações encontradas no site da *Andritz Group* – a Figura 4 mostra uma representação do modelo da máquina secadora que estava sendo simulada – e de base de dados operacionais, cedidos pelo professor Dr. Luis Gonzaga.

Figura 4: Máquina secadora da polpa de celulose

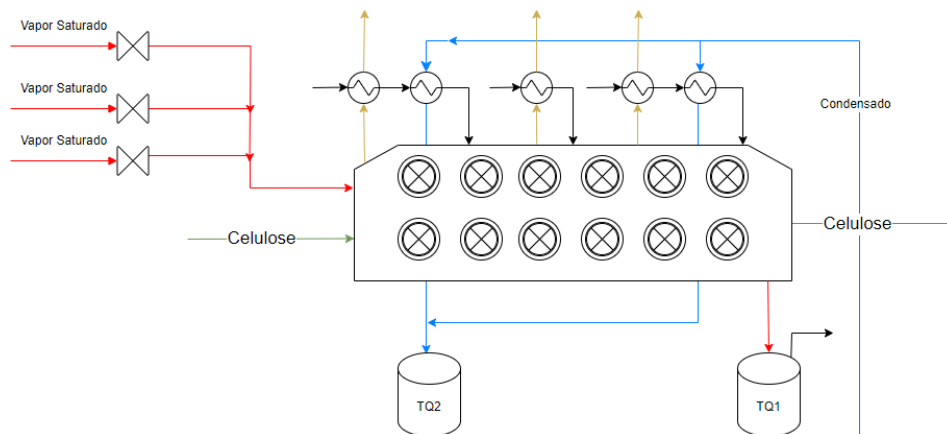


Fonte: *Andritz Group*, 2023

Assim, foi possível avaliar o funcionamento do sistema para que fosse possível entender as possíveis correlações para modelagem. Com o intuito de facilitar a visualização da operação, foi montado um fluxograma de processo que apresentava os principais elementos que precisariam ser contabilizados para o modelo, como pode ser visto na Figura 5, que representa além da secadora convectiva, os outros equipamentos e acessórios associados.

Alguns dos equipamentos incluídos são trocadores de calor, tanques que realizam flasheamento e válvulas, onde passam linhas de vapor saturado, que são necessários para a execução de processos como estes de forma eficiente, de acordo com a literatura e as informações encontradas na página do próprio *Andritz Group*.

Figura 5: Máquina secadora da polpa de celulose



Fonte: Elaborada pelo autor

Além disso, havia informações sobre as restrições operacionais do equipamento e algumas recomendações da operação. Esses estão citadas abaixo:

- A umidade na celulose da saída do processo tem como especificação de ser inferior a 11%;
- Possível incrustação e deposição de celulose ao longo da operação podem afetar a área de troca térmica do equipamento ao longo dos registros;
- Há um sistema de pré-aquecimento do ar que entra na máquina que utiliza do ar de exaustão e do condensado que sai da secadora;
- O ar dentro da secadora tem um processo de recirculação, fazendo com que o ar recircule de 5 a 6 vezes dentro do equipamento.

4.2. Base de Dados

A base de dados fornecida continha registros de histórico correspondentes a três anos de operação. A partir desses dados, foi realizada uma análise detalhada para identificar as variáveis com maior variação e impacto nas variáveis de interesse.

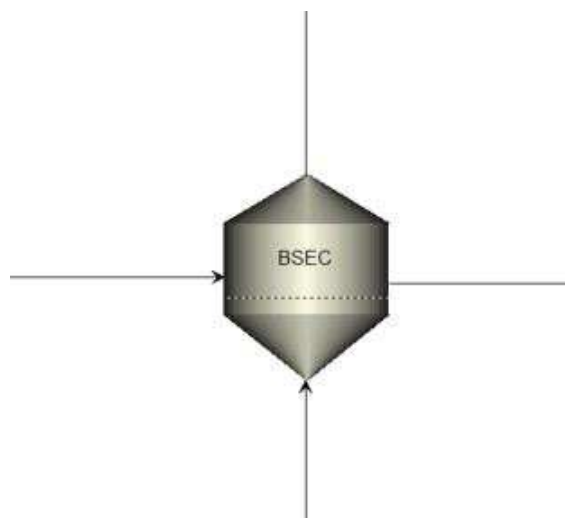
Foi possível notar uma lacuna nessa base de dados sobre informações referentes aos sistemas de trocadores de calor associados a secadora. Através de filtros existentes no *Microsoft Excel*, foi possível interpretar e eliminar essas lacunas e retirar alguns dados anômalos nos registros, podendo – desta forma – ter uma visão mais fidedigna da operação do equipamento, ao longo de um certo período de tempo.

4.3. Modelagem em Aspen Plus

Ao utilizar a ferramenta Aspen Plus para modelar e simular a operação do processo foi essencial compreender como os blocos, que estão previamente implementados no software, funcionam e quais teriam o melhor encaixe para realização do objetivo final.

Enquanto facilmente foi possível escolher o bloco de “*HeatX*” presente no software, para simular as trocas realizadas entre o ar seco que entrará na operação da máquina secadora, o bloco de secagem como representado na Figura 6 precisou ser mais meticulosamente avaliado.

Figura 6: Bloco de secagem em simulador comercial Aspen Plus



Fonte: Elaborada pelo autor

A operação específica que precisava ser avaliada da máquina secadora era de uma secadora convectiva que, no entanto, a implementação do bloco não permitia simular a operação da secadora de forma tal e qual o equipamento original sugere, com a recirculação de ar ocorrendo de 5 a 6 vezes dentro do equipamento. Deste modo, algumas adaptações precisaram ser feitas para continuidade das atividades.

4.4. Hierarquias

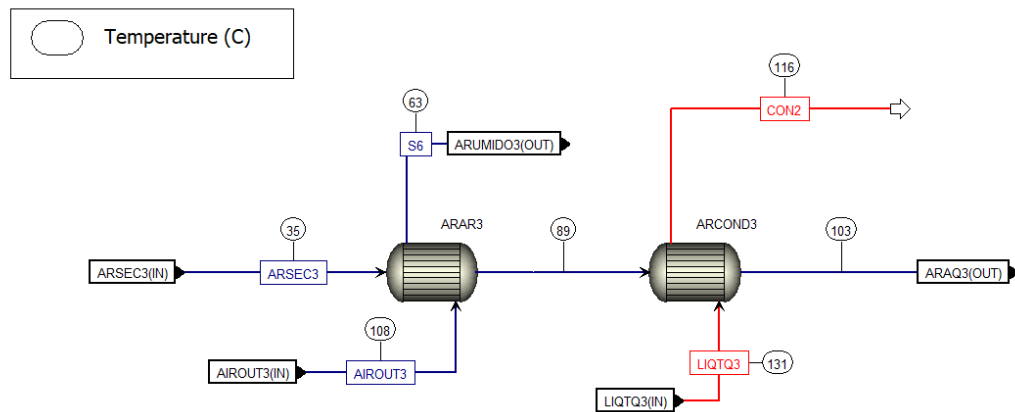
O bloco de “Hierarchy” é uma forma de organizar um ou mais processos extensos em uma forma mais concisa e de fácil visualização e interpretação. Unindo e mesclando resultados necessários para uma simulação mais precisa e coerente. Desta forma, as hierarquias foram moldadas com base no processo operacional de pré-aquecimento do ar seco e da recirculação de ar presente na máquina secadora.

Para representar o pré-aquecimento do ar, com o intuito de melhorar a eficiência energética do processo, foram geradas três hierarquias, com intuito de melhor representar a operação do processo. Como a Figura 5 indica, o processo contém a instalação de alguns trocadores de calor, onde estariam entrando ar seco e saindo o ar de exaustão, o que justifica a decisão de seccionar o processo em três hierarquias, cada hierarquia contendo uma das entradas de ar seco do processo e diversos blocos secadores que, por sua vez, simulariam o ar recirculado.

4.4.1. Pré-aquecimento do ar seco

Na Figura 7, temos a representação interna de um dos blocos de hierarquias do processo, que visava simular a operação de pré-aquecimento do ar seco, antes de sua entrada na máquina secadora. É possível ver um sistema de troca térmica contracorrente, onde o ar seco em temperatura ambiente tem uma elevação de temperatura ao entrar em contato com o ar de exaustão e, posteriormente, com o condensado da máquina secadora.

Figura 7: Processo de pré-aquecimento do ar seco



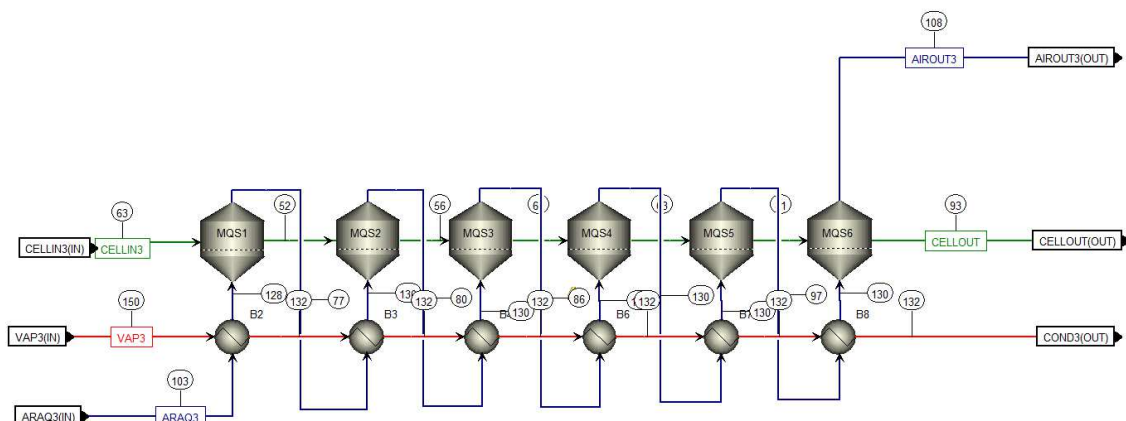
Fonte: Elaborada pelo autor

4.4.2. Recirculação do ar

A Figura 8, mostra a continuidade da solução encontrada para simular a recirculação de ar do sistema. Ao assumir cada bloco de secadora convectiva como um estágio do equipamento, utilizando-se de guia as hierarquias dos trocadores de calor, são gerados assim diferentes seções que realizariam a operação específica da retirada da água presente na celulose.

Assim, tendo como base as hierarquias de pré-aquecimento do sistema para subdividir as hierarquias de secagem, totaliza-se também três hierarquias, cada hierarquia igual em funcionamento interno como apresentado na Figura 8. Cada uma com seis blocos de secagem, representando a quantidade de vezes que o ar passa naquele ponto da máquina secadora.

Figura 8: Representação da recirculação de ar na Máquina Secadora



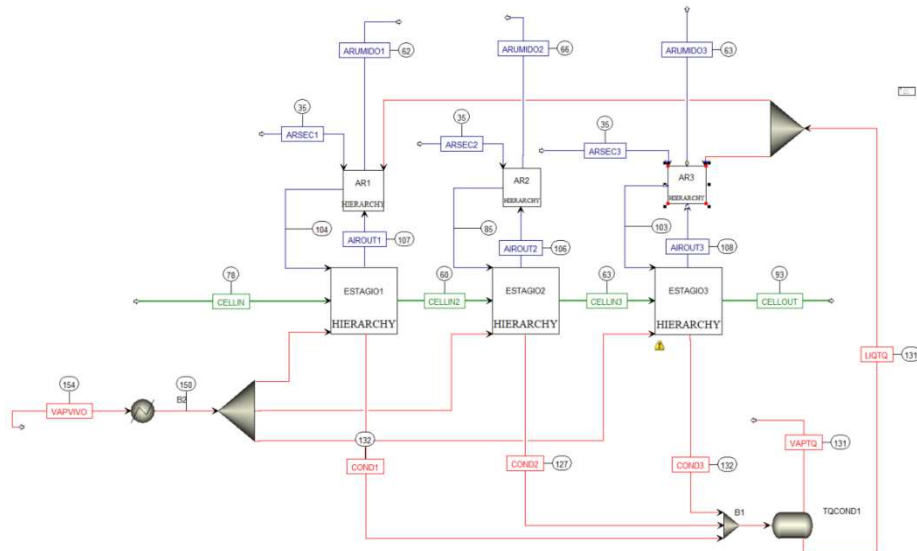
Fonte: Elaborada pelo autor

4.5. Simulação

Por fim, a Figura 9 representa a passagem da celulose ainda úmida pelo equipamento e com a saída de teor de umidade agora mais baixo do que sua entrada. Há uma passagem de “vapor vivo” – vapor saturado – no processo que realiza uma troca térmica com ar seco dentro do equipamento, para que o ar que passa pelo equipamento tenha calor o suficiente para retirada da umidade da celulose.

O vapor que passa pelo equipamento condensa e ao sair do equipamento, a energia proveniente dele é utilizada no sistema de pré-aquecimento do ar, como uma forma de recuperação térmica, antes do condensado ser armazenado nos tanques flash.

Figura 9: Representação do processo de secagem da polpa de celulose completo



Fonte: Elaborada pelo autor

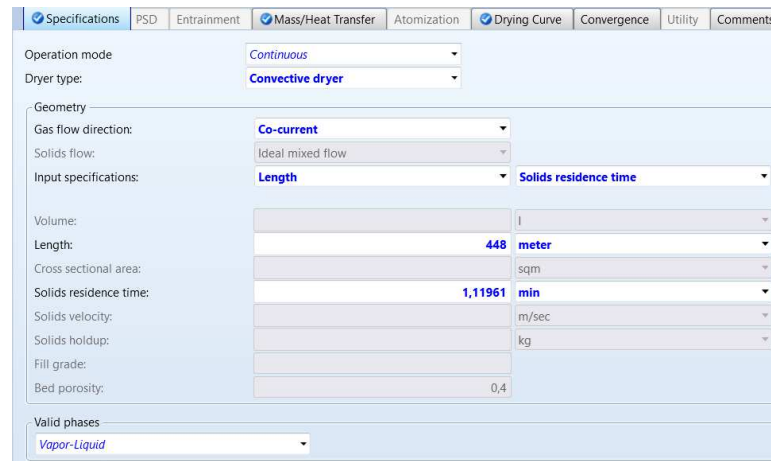
4.6. Validação do Modelo

Devido à falta de informações proveniente de manuais ou parâmetros que eram de necessidade para o modelo, alguns dos parâmetros foram inferidos a partir de informações provenientes da base de dados, assim como das informações presentes na literatura. Informações como tamanho de alguns equipamentos foram inferidos a partir do tempo de residência da polpa da celulose na máquina secadora, a exemplo.

No entanto, algumas informações de projeto não constavam em nenhum dos materiais que se tinha acesso, enquanto a o modelo era executado. Algumas estimativas eram feitas para que fosse possível realizar um processo de ajuste fino dos parâmetros. Com o uso das ferramentas

de otimização interna e de especificação de projetos do Aspen Plus, avaliando concomitantemente a base de dados existente, os parâmetros eram ajustados e adequados. A Figura 10 mostra alguns dos parâmetros que eram conhecidos previamente e precisaram ser reajustados para essas configurações do processo.

Figura 10: Parâmetros e especificações de um dos blocos de secadora



Parameter	Value	Unit
Operation mode	Continuous	
Dryer type	Convective dryer	
Gas flow direction	Co-current	
Solids flow	Ideal mixed flow	
Input specifications	Length	
Solids residence time	1,11961	min
Length	448	meter
Cross sectional area		sqm
Solids velocity		m/sec
Solids holdup		kg
Fill grade		
Bed porosity	0,4	
Valid phases	Vapor-Liquid	

Fonte: Elaborada pelo autor

Duas variáveis foram essenciais para que o modelo fosse validado, preenchendo também as lacunas de informações que existiam no processo, as variáveis escolhidas para essa validação foram o teor de umidade da celulose na saída das hierarquias e o ar de exaustão proveniente da máquina secadora.

Com estes resultados foi possível calcular o *NTU* (Número de Unidades de Transferência), assumindo a variação efetiva apenas dos *NTU* dos blocos de entrada (Estágio 1) e saída (Estágio 6) de cada hierarquia, fixando o valor dos estágios 2 ao 5, como apresenta a Figura 11 o resultado encontrado para as especificações de transferência de massa e calor, com um valor de *NTU* que melhor se ajusta ao Estágio 1 de entrada do sistema.

Figura 11: Aba das especificações de transferência de Massa e Calor

Mass transfer

Calculate mass transfer coefficient from Sherwood number: 2
 Specify mass transfer coefficient: m/sec
 Specify (mass transfer coefficient)*(surface area): l/min
 Specify NTU: 1,17433
 Reference gas velocity: m/sec
 Calculate particle shrinking

Moisture component mass transfer coefficient scale factors

Component	Scale factor

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir disso, foi possível gerar um caso base para estudo da operacionalização normal do processo, dessa forma, é possível testar cenários operacionais com o intuito de otimizar a eficiência energética do processo.

4.7. Avaliação de Cenários Operacionais

Utilizando então do caso base e com a ajuda do Aspen Simulation Workbook, ferramenta de integração de processos com o *Microsoft Excel*, foi possível avaliar com maior organização e de forma mais concisa os casos de estudo para avaliação de cenários.

Foram testados conforme os dados estavam subdivididos os cenários com o intuito de diminuir a temperatura de vapor saturado que passa pelo sistema, mas, sem que interferisse na qualidade do produto final, especialmente, com o teor de umidade da polpa da celulose na saída da máquina secadora.

Enquanto foi possível testar esses dados e ter uma convergência de inúmeros casos, o processo de otimização só foi realmente viável quando avaliou uma parcela dos dados que representaria condições operacionais similares.

Alguns destes pontos operacionais podem ser afetados pelas condições climáticas da região em que essa base de dados tenta representar – ou onde foi coletada –, assim como pontos de excesso de incrustações ou períodos de testagem de estresse de máquina.

5. Conclusão

Após completar o estágio integrado ao curso de engenharia química na Universidade Federal de Campina Grande, pode-se tirar proveitosas conclusões acerca de processos como esse. Desde um maior contato com as ferramentas disponibilizadas pela AspenTech, assim como um aprimoramento no entendimento acerca de modelagem e simulações de processos.

Avaliação de dados operacionais aumenta a complexidade da interação com o modelo, mas, incrementa e refina o processo que está sendo investigado. Fornecendo um modelo robusto e mais bem sofisticado com resultados mais fidedignos e próximos a realidade.

No entanto, devido ao alto nível de complexidade presente em processos de separação de sólidos, houveram inúmeros percalços para contornar algumas das lacunas de informação que existiram ao longo da realização deste estágio. A ferramenta Aspen Plus, ainda que muito completa, tem certa limitação em alguns pontos com processos como o da máquina secadora convectiva.

O modelo pôde ser validado com os dados vigentes, porém, ao ser avaliado em cenários operacionais diversos, encontrou-se dificuldade de convergência para alguns dos parâmetros, todavia, entregou um modelo otimizado em estado estacionário de uma parcela dos dados que apresenta condições de operação similar. Possivelmente, representando um período do ano em que esses dados possam ter sido coletados ou que eles podem vir a representar.

Para trabalhos futuros e melhor entendimento do processo, há uma possibilidade de testar este mesmo modelo, agora em um regime dinâmico, para avaliar de forma mais aprofundada o processo realizado pela máquina secadora. Aumentando a complexidade do sistema, mas, dando uma perspectiva nova acerca do desempenho da máquina secadora.

Referências

- ABDELOUAHAB, N. B *et al*, Convective drying of a porous medium with a paste cover. *Eur. Phys. J. E*, v. 42, p. 66, 2019;
- AGHBASHLO, M. Exergetic simulation of a combined infrared-convective drying process. **Heat and Mass Transfer**, v. 52, p. 829-244, 2015;
- ANDRITZ. Pulp Drying Services. Disponível em: <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/service-solutions/pulp-drying-service>. Acesso em: 5 de Janeiro de 2025
- CASTRO, HF de. Processos Químicos Industriais II, Apostila 4, Papel e Celulose. **Universidade de São Paulo–EEL**, 2009;0
- CHAUDHRY, Hussam Nasarullah; HUGHES, Ben Richard; GHANI, Saud Abdul. **A review of heat pipe systems for heat recovery and renewable energy applications**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 2249–2259, 2012;
- DA SILVA JÚNIOR, Francides Gomes; BRITO, José Otávio. **CAPÍTULO II POLPAÇÃO. PANORAMA DE LA INDUSTRIA DE CELULOSA Y PAPEL EN IBEROAMÉRICA 2008**, p. 61;
- DINÇER, I.; ZAMFIRESCU, C. **Drying Phenomena Theory and Applications**. [S.I]: Wiley, 2016. p. 512
- GARCIA, Monica; KNUUTILA, Hanna K.; GU, Sai. **ASPEN PLUS simulation model for CO₂ removal with MEA: Validation of desorption model with experimental data**. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 22, p. 239-249, 2017. ISSN 2213-3437;
- GHODBANAN, Shaaban; ALIZADEH, Reza; SHAFIEI, Sirous. Optimization for energy consumption in drying section of fluting paper machine. **Thermal science**, v. 21, n. 3, p. 1419-1429, 2017;
- GRUS, Joel. **Data science from scratch: first principles with python**. O'Reilly Media, 2019;
- HAYDARY, Juma. Chemical process design and simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys applications. John Wiley & Sons, 2018;

JOUHARA, Hussam; OLABI, Abdul Ghani. **Editorial: Industrial waste heat recovery.** *Energy*, [s.l.], 2018;

JOUHARA, Hussam et al. *Waste heat recovery technologies and applications.* Thermal Science and Engineering Progress, v. 6, p. 268–289, 2018

JUVENAL, Thais Linhares; MATTOS, René Luiz Grion. O setor de celulose e papel. 2002;

LIU, F.; HE, C.; SONG, J.; LI, H.; ZHANG, C. Effects of light quality on growth and development of strawberry plants. *Scientia Horticulturae*, v. 153, p. 124-130, 2013. ISSN 0924-4247

MUTLU, Ö. Ç.; ZENG, T. Challenges and Opportunities of Modeling Biomass Gasification in Aspen Plus: A Review. *Chemical Engineering & Technology*, v. 43, p. 1674-1689, 2020;

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying.** 4.ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 1352p.

OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY, THE – OEC. Sulfate Chemical Woodpulp. **OEC**, 2020. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/hs/sulfate-chemical-woodpulp?yearSelector1=2019>. Acesso em: 27 dez. 2024.

ONWUDE, D. I.; HASHIM, N.; JANIUS, R. B.; NAWI, N. M.; ABDAN, K. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, p. 599–618, 2016;

PACHECO, Ana Claudia Werner et al. Modeling of drying and adsorption isotherms of the fish feed. **Brazilian archives of biology and technology**, v. 54, p. 577-588, 2011;

QIN, Yutao; ZHUANG, Yu; WANG, Chao; ZHANG, Lei; LIU, Linlin; DU, Jian. Multi-objective optimization and comparison of the entrainer-assisted pressure-swing distillation and extractive distillation separation sequences for separating a pressure-insensitive binary azeotrope. *Computers & Chemical Engineering*, v. 165, 2022, p. 107959. ISSN 0098-1354;

SANQUETTA, Carlos Roberto et al. Mercado de celulose no Brasil e em cinco grandes países. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 2, p. 189-194, 2020.

