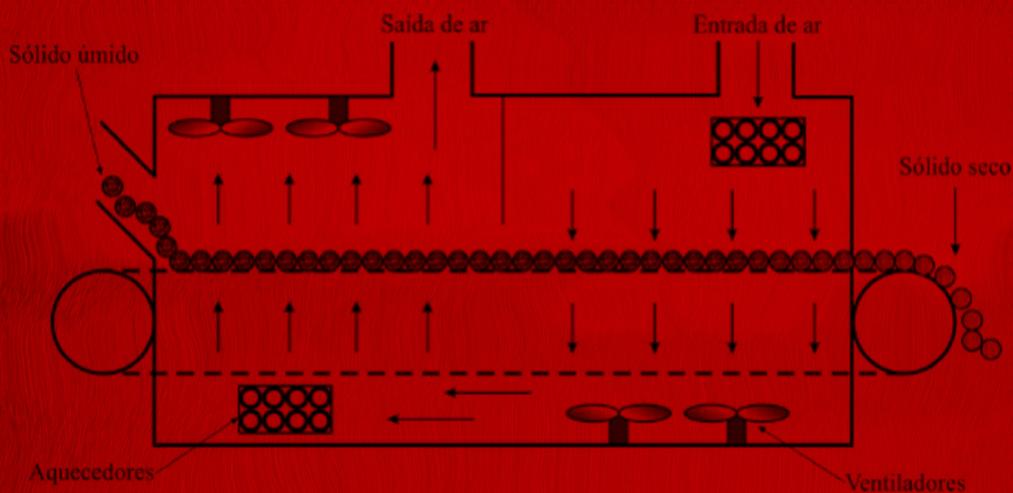


Juliano Katayama Groff
Oswaldo Curty da Motta Lima
Luiza Helena Costa Dutra Sousa

Redimensionamento e análise térmica
de equipamento de secagem contínua
utilizando princípios fundamentais de

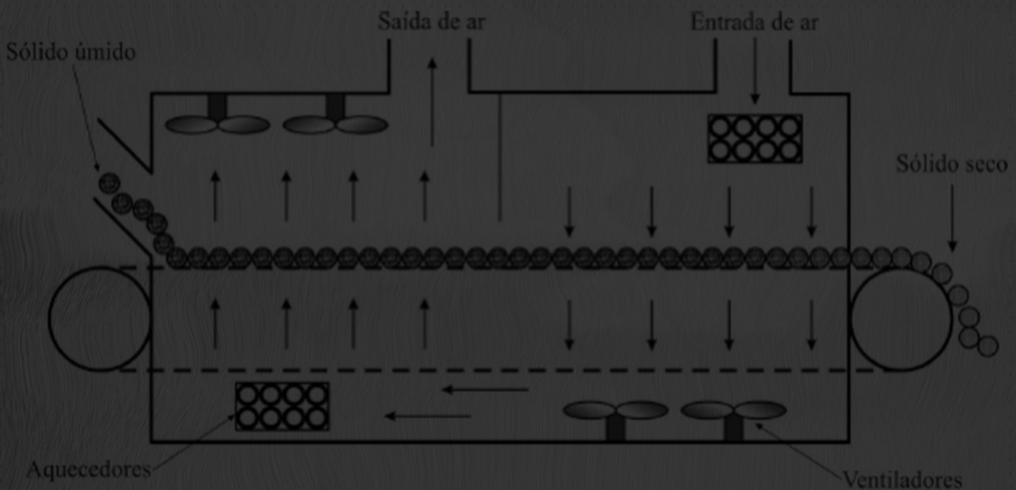
TRANSFERÊNCIA DE MASSA E CALOR



Juliano Katayama Groff
Oswaldo Curty da Motta Lima
Luiza Helena Costa Dutra Sousa

Redimensionamento e análise térmica
de equipamento de secagem contínua
utilizando princípios fundamentais de

TRANSFERÊNCIA DE MASSA E CALOR



Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2023 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2023 Os autores

Copyright da edição © 2023 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Redimensionamento e análise térmica de equipamento de secagem contínua utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor

Diagramação: Letícia Alves Vitral
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Autores: Juliano Katayama Groff
 Oswaldo Curty da Motta Lima
 Luiza Helena Costa Dutra Sousa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
G874	<p>Groff, Juliano Katayama Redimensionamento e análise térmica de equipamento de secagem contínua utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor / Juliano Katayama Groff, Oswaldo Curty da Motta Lima, Luiza Helena Costa Dutra Sousa. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-1459-9 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.599232405</p> <p>1. Secagem. I. Groff, Juliano Katayama. II. Lima, Oswaldo Curty da Motta. III. Sousa, Luiza Helena Costa Dutra. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 660.28426</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná – Brasil
 Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Esta obra é o resultado de uma reformulação da dissertação intitulada “Redimensionamento e análise térmica de equipamento de secagem contínua utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor”, o qual foi realizado por mim, Juliano Katayama Groff, que fui orientado pelo Prof. Dr. Oswaldo Curty da Motta Lima. O trabalho foi apresentado em janeiro de 2014 na Universidade Estadual de Maringá (UEM). Esta pesquisa também se encontra disponível na Biblioteca da UEM. Equipamentos industriais são projetados, fabricados e adaptados para a utilização de uma indústria e do contrário do que se observa são adaptados à realidade do processo e da capacidade produtiva da indústria. Este trabalho demonstra simulações de inúmeros cenários de um equipamento de secagem contínua variando parâmetros como temperatura, umidade, velocidade da esteira dentre outras. Os resultados demonstraram sugestões para a modificação do equipamento no qual se adaptara a realidade da indústria em questão. Desta forma, convidamos os caros leitores à uma leitura aberta, profunda e crítica acerca do tema.

Este trabalho apresenta uma análise da secagem da gelatina em escala industrial, de redimensionamento e avaliação térmica do equipamento de secagem contínua baseada nos fenômenos de transferência de massa e calor. Industrialmente, equipamentos são desenvolvidos e comercializados, seus métodos e critérios não são divulgados e cada empresa possui suas características para a operacionalização de tal equipamento, muitas vezes, baseado apenas em tentativa e erro. Como forma de avaliar tal método e tornar útil esta intermediação são propostos, de forma sistemática, critérios e hipóteses para avaliação do secador do tipo esteira realizando os respectivos balanços de massa e energia por câmara e o redimensionamento do equipamento simulando a velocidade da esteira em 6m/h, 12m/h, 18m/h e 24m/h, todas suas características e também uma análise da eficiência do equipamento em função das propriedades de transferência de calor e massa. Como forma de validar o método e propor melhorias para futuros projetos do mesmo equipamento, com as mesmas funções, foi realizada uma comparação a dados de equipamento industrial que opera há vários anos. O método proposto demonstra a possibilidade de aumentar a velocidade em até 18m/h com erro de no máximo 31,6% para a umidade final, a impossibilidade de secagem inicial a temperaturas acima de 52°C e o uso do balanço energético aproximando a gelatina como um cilindro oco. Os resultados da simulação comparada com o equipamento real demonstrou grande aproximação dos dados o que permite concluir que é possível utilizar dados de secagem em laboratório e por meio de balanço material e de energia prever e projetar equipamentos levando em consideração as necessidades de qualidade do produto final.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem, secador convectivo, secagem de gelatina, secador esteira.

This work presents an analysis of gelatin drying on an industrial scale, resizing and thermal evaluation of continuous drying equipment based on mass and heat transfer phenomena. Industrially, equipment is developed and commercialized, its methods and criteria are not disclosed and each company has its characteristics for the operation of such equipment, often based only on trial and error. As a way of evaluating this method and making this intermediation useful, criteria and hypotheses are systematically proposed for evaluating the belt-type dryer, performing the respective mass and energy balances per chamber and resizing the equipment simulating the speed of the belt in 6m /h, 12m/h, 18m/h and 24m/h, all their characteristics and also an analysis of the efficiency of the equipment in terms of heat and mass transfer properties. As a way of validating the method and proposing improvements for future projects of the same equipment, with the same functions, a comparison was made with data from industrial equipment that has been operating for several years. The proposed method demonstrates the possibility of increasing the speed up to 18m/h with a maximum error of 31.6% for the final moisture, the impossibility of initial drying at temperatures above 52°C and the use of energy balance approximating gelatine as a hollow cylinder. The results of the simulation compared with the real equipment showed a great approximation of the data, which allows us to conclude that it is possible to use drying data in the laboratory and, through material and energy balance, predict and design equipment taking into account the quality needs of the final product.

KEYWORDS: Drying, convective dryer, drying gelatin dryer belt.

INTRODUÇÃO	1
REVISÃO DA LITERATURA	3
A GELATINA.....	3
Propriedades físicas e químicas da gelatina.....	4
O processo de fabricação.....	4
A SECAGEM.....	5
CURVAS DE SECAGEM	7
O Material sólido	10
O agente de secagem.....	11
Condições internas de secagem	12
Local de secagem.....	14
SECAGEM DE ALIMENTOS.....	14
EQUIPAMENTO DE SECAGEM.....	15
Análise e seleção do equipamento	15
Tipos de secadores.....	17
SECAGEM DA GELATINA.....	18
PROJETO E OTIMIZAÇÃO DO SECADOR	21
SECADOR CONVECTIVO DO TIPO ESTEIRA	22
METODOLOGIA	24
ANÁLISE DE REDIMENSIONAMENTO E CONDIÇÕES MECÂNICAS OPERACIONAIS	24
Comprimento do secador por tempo de secagem.....	24
Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito	24
Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da vazão mássica.....	25
EFEITO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA NO PROCESSO DE SECAGEM.....	25
BALANÇO DE MASSA.....	27
PERFIL DE UMIDADE DO AGENTE DE SECAGEM	28

BALANÇO ENERGÉTICO	28
DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM TERMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA.....	30
Parâmetros de transferência de calor e massa no equipamento	30
RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO INDUSTRIAL.....	31
ANÁLISE DE REDIMENSIONAMENTO E CONDIÇÕES MECÂNICAS OPERACIONAIS.....	33
Comprimento do secador por tempo de secagem.....	33
Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito	34
Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da vazão mássica.....	34
BALANÇO DE MASSA GERAL	35
EFEITO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA E DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE SECAGEM.....	36
Análise das necessidades energéticas ao longo do equipamento	37
Análise do consumo do vapor.....	38
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA EM TERMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA.....	39
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
REFERÊNCIAS	42
SOBRE O AUTOR	45

INTRODUÇÃO

Grande parte das indústrias de transformação possui muitas características em comum e processos semelhantes, porém, devido ao produto que é produzido e comercializado, existem particularidades na sua produção e diferenciação nos seus equipamentos. Na fase final do processamento, em muitas indústrias, encontra-se um equipamento responsável por fazer a retirada da umidade. Este processo muitas vezes é necessário devido à própria qualidade do produto ou em questões econômicas para o transporte do mesmo, o que faz deste equipamento algo essencial e fundamental em todo final de processo.

No mercado existem mais de 200 tipos de secadores (ERBAY, 2010), equipamento responsável pela retirada da umidade, porém, os secadores são fabricados e testados baseados em matéria-prima de uso comum ao invés de ser utilizado um material mais específico para o equipamento. Desta forma, pode-se afirmar que existe uma defasagem e muitas indústrias utilizam secadores que não são tão adaptados ao produto em questão. Além disso, o valor do investimento é muito superior ao custo de desenvolvimento e fabricação do equipamento, sem mencionar a flexibilidade que muitos fabricantes não possuem.

A concepção de secadores otimizados tornou-se um problema, e às vezes, um desafio. Não estando facilmente disponível a avaliação do tipo adequado de equipamento, sua estrutura em forma de fluxograma associado, sua construção e condições de funcionamento de cada unidade envolvida na concepção global. No entanto, a maioria dos esforços de projeto neste campo enfrentam problemas de extrema dificuldade, relacionados a condições de secagem que incluem inúmeros fenômenos interligados e opostos, principalmente devido à natureza complexa deste processo (KIRANOUDIS et al., 1996).

Como forma de solucionar este impasse, tratando o projeto do equipamento em uma abordagem diferente, é necessária a utilização de algo mais específico, que atenda de forma pontual cada produto, respeitando seus padrões de qualidade e que, conseqüentemente, sejam acessíveis ao empreendimento. O resultado poderá gerar uma alternativa para mudanças operacionais e de projeto no equipamento, tornando-o mais específico para o produto.

Este livro é o resultado de uma pesquisa de mestrado na área de ciências térmicas e propôs uma análise de redimensionamento de equipamento para secagem contínua de gelatina e sua avaliação térmica baseada nos fenômenos de transferência de massa e calor e a cinética de secagem específica da matéria-prima. Como resultado obteve-

se uma análise das dimensões e eficiências baseando-se nas propriedades térmicas do equipamento e sugestões para a melhoria do processo.

REVISÃO DA LITERATURA

Na revisão da literatura são apresentadas as principais características da gelatina dentre as quais suas propriedades físico químicas e o modo como industrialmente é produzida. No processo final da fabricação da gelatina ocorre o processo de secagem, nesse caso, são abordados os elementos principais da secagem incluindo o agente de secagem e as principais características do sólido úmido. Por fim são apresentados os equipamentos de secagem e principalmente o equipamento específico da gelatina sendo o equipamento de secagem contínua do tipo esteira.

A GELATINA

A gelatina é uma molécula de proteína desnaturada, solúvel em água e obtida por hidrólise parcial do colágeno derivado da pele, tecido conjuntivo branco de ossos de animais (GHOSHAL et al., 2010). No entanto, o surto da doença da vaca louca (BSE) na década de 1980, acelerou a procura de formas alternativas. As fontes abastecedoras de colágeno para a produção de gelatina são os curtumes, abatedouros, processadores de produtos cárneos e similares. Matérias-primas para a produção de gelatina são abundantes e de baixo custo em todo o mundo (BAE et al., 2009).

A gelatina consiste em três cadeias polipeptídicas prolongadas, cada uma em formato de uma hélice, sendo sua estrutura em tripla hélice e estabilizada pela formação de intercadeias que possuem ligações de hidrogênio. Durante o processo de desnaturação, a estrutura é dividida para formar moléculas isoladas numa solução aquosa. Algumas cadeias de gelatina podem se associar umas às outras para formar um colágeno semelhante a um helicoidal triplo. Sabe-se que a presença de água ligada desempenha um importante papel estrutural e funcional em muitas proteínas. Nessas proteínas, a água ligada forma pontes de hidrogênio vinculadas com a tripla hélice. Espera-se que o desenrolar desta hélice seja acompanhada pela dissociação da água ligada com a estrutura da gelatina (CHI-AN DAI et al., 2006).

Sua composição básica consiste de 84 a 90% de proteínas, 1 a 2% de sais minerais e 8 a 15% de água. Não contém conservantes, aditivos, gorduras, carboidratos, purina ou colesterol, sendo um colágeno desnaturado com baixa antigenicidade e relativamente econômico. Ela tem sido amplamente aplicada como material para microesferas, vedantes, adesivos de tecidos e transportadores para sistemas de distribuição de drogas (SAITO et al., 2004).

Segundo Shyamkuwar et al. (2010), a gelatina tem larga aplicação em alimentos, produtos farmacêuticos, e indústrias fotográficas. Ao contrário do colágeno, que não

expressam antigenicidade em condições fisiológicas, é completamente reabsorvível *in vivo* e suas propriedades físico-químicas podem ser adequadamente moduladas.

Propriedades físicas e químicas da gelatina

A gelatina possui várias propriedades intrínsecas e variáveis, o que torna diversificado o seu aproveitamento para diversos setores das mais variadas indústrias, exemplos dessa variabilidade são a solubilidade, capacidade de formar gel, viscosidades, *bloom* entre outras. Seu valor energético é compreendido entre 1350 e 1450 kJ para cada 100 gramas (ou 350 e 370 kcal), contribuindo como alimento funcional, pois auxilia no metabolismo.

A gelatina, a temperatura de cerca de 40°C, em solução aquosa se transforma em gel quando são arrefecidas até à temperatura ambiente, desde que sua concentração seja elevada o suficiente. No entanto, a principal desvantagem da gelatina como uma matéria-prima é a sua fraca resistência mecânica, o que pode limitar suas possíveis aplicações como um material biomédico (SHYAMKUWAR et al., 2010).

O processo de fabricação

Na Figura 3.2 observa-se o fluxograma simplificado do processo de fabricação da gelatina em que se inicia pelo corte, preparação da matéria prima, extração, desidratação até a secagem.

A pele passa pelo sistema de corte e é então transportada para o triturador que funciona como um moedor de carne. Após o corte, a pele segue para os tanques de extração onde recebe tratamento ácido ou alcalino dependendo do tipo de pele. Após a etapa de hidrólise, há uma reação de neutralização, para que o pH da solução seja aumentado. Nesta etapa, adiciona-se solução de hidróxido de sódio aos tanques de extração a temperatura ambiente e, após a reação, a solução alcalina é drenada. Este processo ocorre dentro dos tanques extratores, local em que a pele se encontra e onde se adiciona água à temperatura superior a 50°C. Esta água aquecida permanece em contato com a superfície de extração por um determinado período. Quanto maior o tempo de contato entre a água e a pele, maior será a quantidade de produto extraído.

A solução de gelatina com baixa concentração é enviada para uma unidade de ultrafiltração. A segunda filtração ocorre de forma semelhante à primeira, também em um filtro prensa. Essa etapa serve para a remoção de partículas suspensas e que eventualmente precipitaram e não foram retiradas nas etapas anteriores. Quando a gelatina sai da filtração forte está com uma concentração bem maior do que aquela da entrada na unidade. Logo é enviada para uma unidade evaporadora para que ocorra mais remoção de água. Assim a gelatina é lançada no interior do cilindro, depositando-se nas paredes à medida que se

solidifica.

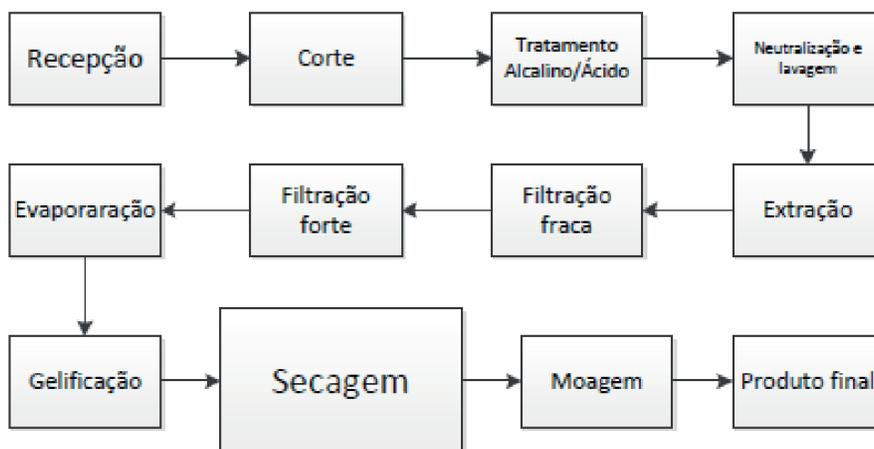


Figura 2.2 – Fluxograma do processo de produção da gelatina.

Fonte: Autoria própria.

A superfície de resfriamento deste trocador de calor é então raspada, ao mesmo tempo em que impulsiona a gelatina solidificada para a esteira em direção ao secador. Assim é, extrusada e assume a forma de um cilindro contínuo em formato de macarrão que se deposita sobre a superfície da entrada do secador uma esteira perfurada móvel, que adentra a um secador subdividido em câmaras, onde atinge a umidade final desejada. Normalmente, esta umidade se encontra em torno de 10% (base seca), pois até esta umidade a gelatina pode ser considerada um material higroscópico, termo sensível e não poroso, para efeito de secagem (NEITZEL, 1987).

No término da secagem, após o último túnel, há um eixo espiral dentado com finalidade de quebrar a gelatina seca que sai do secador. Em seguida, a gelatina vai para o moinho, onde sofre processo de quebra para assim atingir granulometria aproximadamente iguais.

A SECAGEM

A transferência de calor e massa tem lugar em um grande número de processos. Esses fenômenos são encontrados em sistemas composto por duas ou mais fases, transferência de calor e massa em sistemas gás-líquido é amplamente encontrado no contexto das várias operações unitárias, incluindo a destilação, extração, absorção e secagem. No entanto, embora os esforços tenham sido focados na compreensão e previsão física em tais sistemas, estes problemas continuam com muitas incógnitas (PADOIN, 2014).

As operações de secagem são amplamente utilizadas como um método de conservação na indústria de alimentos. Os produtos secos têm maior limitação em termos de deterioração, devido à baixa atividade da água, e são facilmente transportados e armazenados, em função do volume reduzido sem a necessidade de refrigeração, o que representa economia de energia. No entanto, alterações importantes no sabor, cor e aroma podem estar presente, e dependendo da intensidade do efeito e do processo de secagem, pode-se ocorrer a perda ou inutilização do produto para uma determinada função (PERUSSELLO, 2012).

A secagem é uma das operações unitárias mais antigas, e recentemente se tornando generalizada em diversos setores. Ela tem sido usada na indústria alimentícia, agrícola, cerâmica, química, farmacêutica, papel e celulose, mineração, indústria de polímeros e têxteis para diversos objetivos. Os métodos de secagem são diversificados e cada um com um propósito diferente em cada processo. (ERBAY, 2010)

Este processo é complexo e envolve troca simultânea de calor e a transferência de massa (XUESONG LIU, 2009). Consiste na transferência de um líquido que está contido no sólido úmido para uma fase gasosa não saturada. Tal fenômeno é idêntico ao processo de evaporação, porém há a influência do sólido (FOUST, et al., 1982). A umidade é retirada pelo fornecimento de calor a este por meio de um gás secante que apresenta menor concentração de umidade em relação a concentração de equilíbrio. A tendência é o sistema entrar em equilíbrio mássico e térmico. O esquema deste processo demonstra-se na Figura 2.3.

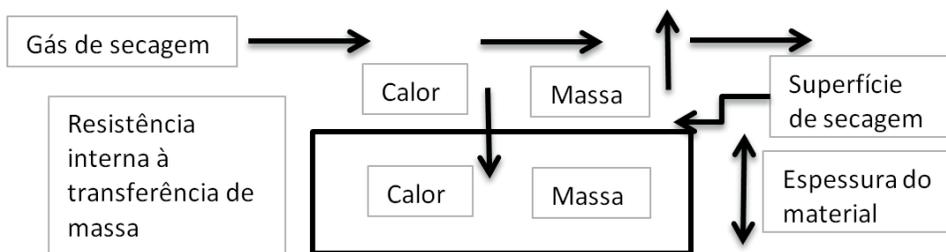


Figura 2.3 – Esquema de um processo de secagem.
Fonte: Adaptado de Geankoplis (1993).

Industrialmente é muito comum o equipamento destinado a secar o material estar no final do processo. (MCCABE, 1993)

A água pode ser retirada por centrifugação, prensa, evaporação ou outros meios. Em termos industriais ainda o mais rentável é a forma mecânica, o que se torna aconselhável retirar antes da etapa de secagem o máximo de umidade possível de forma alternativa. A

umidade pode estar na superfície do sólido, contido dentro dele ou em ambas as partes. Devido aos fatores mencionados, torna-se impossível o projeto de um equipamento de forma generalizada e simplificada. Características como forma, cor, estabilidade e textura influenciam fortemente no preço de venda do produto, o que comprova a forte dependência do processo de secagem (FOUST et al., 1982).

Alguns produtos exigem ambientes com altas temperaturas e outros moderados, alguns exigem maior tempo de secagem, diferentes formas de contato entre o agente de secagem e o produto e, também, no que diz respeito à movimentação do sólido. Devido a estas particularidades é que existe uma grande variedade de secadores no mercado. O processo de secagem pode se dividir em direto e indireto, a forma de secar direta se caracteriza pelo agente de secagem manter contato direto com o produto. A secagem indireta possui uma limitação física entre a forma de transferir o calor, como exemplo, uma superfície de contato que transmite calor por condução, ou por micro-ondas, no qual o agente responsável pela evaporação da umidade são ondas eletromagnéticas. (MCCABE, 1993)

CURVAS DE SECAGEM

Em geral o comportamento da umidade no processo de secagem é semelhante em muitos materiais estando em secadores diferentes. Porém, cada material apresenta uma particularidade, o conhecimento das isotermas de umidade de equilíbrio é muito importante para a análise de processos de secagem e armazenamento. Motta Lima et al. (2004) realizou testes experimentais com fibras de celulose de “Pinnus” de madeira e avaliou a influência da temperatura em seu comportamento. Dados de equilíbrio experimentais foram obtidos usando o método tradicional de expor o material sólido para diferentes ambientes e condições de temperatura e umidade relativa do ar, controlada por soluções salinas (método estático), dentro de um forno com recirculação de ar. A Figura 2.4 demonstra tal dinâmica e o comportamento da umidade.

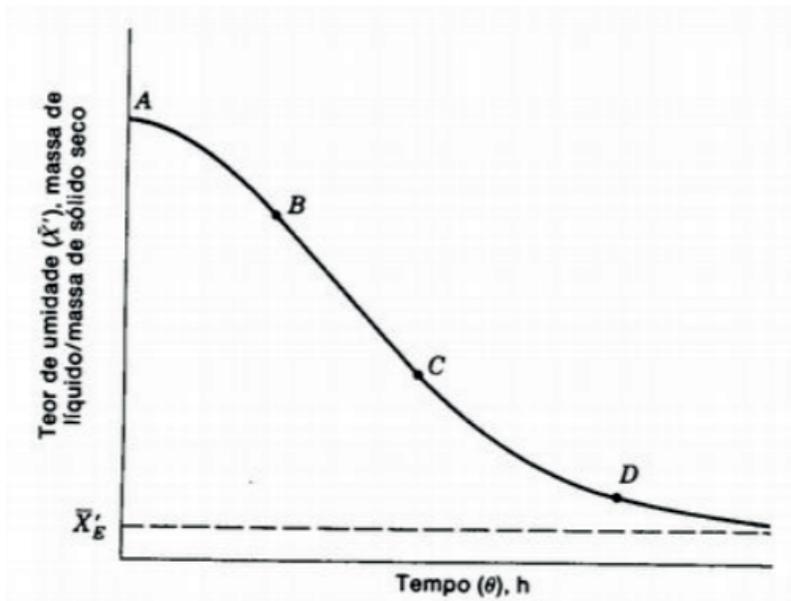


Figura 2.4 – Curva de umidade de equilíbrio por tempo.
 Fonte: Foust et al. (1982).

O período inicial de secagem, representado pelas linhas AB e A'B, pode apresentar aumento ou diminuição na taxa de secagem em função do calor sensível, absorvido ou perdido pelo sólido em relação ao meio secante, sofrendo grande influência das características iniciais do agente de secagem. A tendência é atingir a temperatura de equilíbrio e em certos casos, este período é muito curto ou pode ser desprezado (STRUMILLO E KUDRA, 1986).

Denominado de período de secagem a taxa constante, representado pela linha BC, este apresenta uma taxa de remoção de umidade do sólido que permanece constante por um período. Isto se deve, inicialmente, à presença de um filme de água sobre a superfície do sólido que é posteriormente substituído pela umidade vinda do interior do sólido à medida que a evaporação da umidade da superfície ocorre (GEANKOPLIS, 1993).

A temperatura da superfície do sólido é constante, ocorre a evaporação e a esta temperatura na superfície dá-se o nome de temperatura de bulbo úmido. Este período tem fim exatamente quando a umidade atinge a umidade crítica e a taxa de secagem não se faz mais constante. (FOUST et al., 1982)

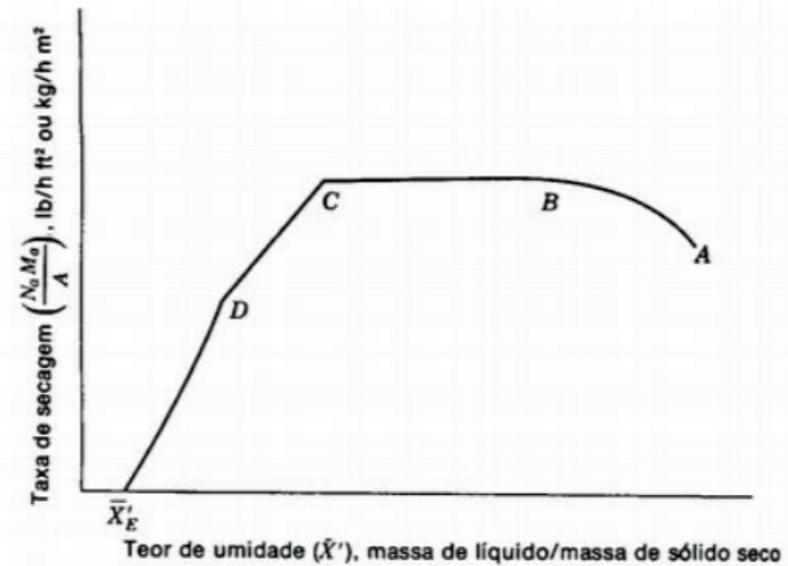


Figura 2.5 – Taxa de secagem por umidade.
 Fonte: Foust et al. (1982).

Na curva CD o período no qual a taxa de secagem é decrescente (Figura 2.5), a temperatura do sólido aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem (BROOKER *et al.*, 1992). Há um aumento da temperatura do sólido e pode ocorrer um prolongamento no tempo de atividade superando o tempo no qual a taxa de secagem é constante. A superfície do material sólido se torna pobre em líquido, o movimento do líquido no interior para a superfície é menor do que o líquido retirado da superfície pelo agente de secagem (FOUST, 1982).

No período de taxa decrescente, a secagem é influenciada pela estrutura interna do sólido que gera uma dinâmica na movimentação da água, podendo este ocorrer por difusão, capilaridade, gravidade, sequências de vaporização (condensação e contração) ou gradientes de pressão. Contudo, os mecanismos mais discutidos na literatura são a difusão e a capilaridade. (PERRY E CHILTON, 1973). O conhecimento das isotermas de equilíbrio pode estar relacionado tanto a modelos teóricos existentes na literatura, como a modelos empíricos. Segundo Barrozo *et al.* (1998) os modelos empíricos são mais utilizados que os teóricos pela maior precisão e praticidade com uma ampla faixa de umidade e temperatura do ar.

No trabalho de Fiorentin *et al.* (2010), que secou bagaço de laranja, os autores mostraram que quanto maior a temperatura de secagem, menor o tempo de secagem e que a temperatura influencia tanto o período a taxa constante quanto o período a taxa decrescente de secagem.

A secagem de vários produtos pode ser descrita por modelos matemáticos semi-empíricos ou puramente empíricos, os modelos semi-empíricos baseiam-se na analogia com a Lei de Newton para o resfriamento, enquanto que, os modelos empíricos apresentam uma relação entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem. Como exemplo Menezes et al. (2013) analisaram a secagem convectiva em leite fixo do bagaço do maracujá amarelo. Nos ensaios de secagem, foram coletados os valores de massa do bagaço em função do tempo, utilizando-se um secador convectivo. As curvas de secagem e de taxa de secagem foram ajustadas aos modelos propostos por Page e Motta Lima e colaboradores e aos modelos propostos por Hogdes e Toffoli, respectivamente. Outros modelos matemáticos também foram ajustados para cada secagem. Por meio dos resultados foi verificado que o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem.

O Material sólido

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades de secagem do ar e a forma de transferir calor, podem determinar inúmeras condições operacionais. Portanto, é necessário estudar as características dos produtos e as condições do processo em si, a fim de obter-se o produto desejado final com menor demanda energética possível (PERUSSELLO, 2012).

A secagem de partículas sólidas, em um leito na presença de um agente gasoso como transferidor de calor, é largamente utilizado comercialmente. Fluxos interagindo mais frequentemente são organizados em contracorrente (secadores de coluna) ou um fluxo cruzado (transportadores de correia com sopro) (NAKORCHEVSKII et al., 1994).

Sólidos granulares ou cristalinos

Este tipo de material retém a umidade nos poros, o movimento da umidade é livre e com isso interfere no tempo de secagem no que diz respeito ao período a taxa constante. Sólidos desta forma, em geral inorgânicos, são pouco afetados pelo líquido e sofrem pouco devido ao processo de retirada de umidade. Logo existe pouca preocupação sobre o produto seco. Há uma possibilidade de se trabalhar em ampla faixa de temperatura em que a umidade de equilíbrio se aproxima de zero. (FOUST et al., 1982)

A secagem por convecção de materiais porosos é de interesse para muitas aplicações industriais, como a produção de materiais de construção (betão, tijolo, placa de gesso, etc.), processamento de alimentos, madeira e produção de papel. Previsões precisas de calor por convecção e transferência de massa em interfaces de materiais ao ar poroso são essenciais em muitas aplicações de engenharia. (DEFRAEYE, BLOCKEN E CARMELIET, 2012)

Para os processos de secagem, existem termos importantes para se definir como os tipos de umidade:

- Umidade em base seca (B.S): é a umidade contida no sólido, usualmente descrita em termos mássicos, por meio da seguinte relação: massa de água por massa de sólido seco
- Umidade em base úmida (B.U): é a quantidade de umidade do material como a porcentagem de peso do sólido úmido, na forma de: massa de água por massa de sólido úmido. (SILVA, 1995)

Sólidos amorfos, fibrosos ou gelatinosos

Em termos de processo, o que caracteriza este tipo de material é a retenção da umidade interna, ou umidade ligada. Esta que por sua vez se movimenta de forma lenta, ocorrendo por difusão ou capilaridade e fazendo com que a velocidade de secagem seja controlada por este mecanismo interno. Este tipo de material apresenta teor de umidade de equilíbrio elevado, são fortemente afetados pela remoção da água, podendo ocorrer rachadura superficial e possibilidade de formação de camada impermeabilizante. Exemplo: Ovos, detergentes, colas, cereais, amido etc. (FOUST et al., 1982)

O agente de secagem

Para a secagem convectiva o agente é o ar atmosférico que é responsável por transferir o calor necessário para gerar a evaporação do excedente de água e após isso retirar o vapor d'água em excesso para fora do equipamento. Para avaliar aspectos termodinâmicos do ar e água, utiliza-se um banco de dados de propriedades dos mesmos, podendo ser traduzido na forma de carta contendo vários gráficos que se inter-relacionam, mais conhecido como carta psicrométrica. (PERRY E CHILTON, 1973)

A psicrometria traduz as propriedades termodinâmicas do ar e conseqüentemente possuem terminologias importantes tais como a umidade absoluta que é igual a massa de vapor de água transportados por massa de ar seco. Quando a pressão parcial do vapor de água no ar, a uma dada temperatura é igual à pressão de vapor de água à mesma temperatura, o ar está saturado e a umidade absoluta é denominada umidade de saturação. (FOUST 1982)

A umidade relativa é definida como a pressão parcial do vapor de água no ar dividida pela pressão de vapor de água a uma dada temperatura de saturação. O ponto de orvalho, ou temperatura de saturação, é a temperatura a que uma determinada mistura de vapor de água e de ar saturado, por exemplo, a temperatura na qual a água exerce uma pressão de vapor igual a pressão parcial de vapor de água na mistura. (FOUST 1982)

No eixo horizontal apresenta-se a temperatura do ar seco, as linhas transversais em direção a curva de saturação representam a temperatura de bulbo úmido, temperatura esta que se encontra imediatamente sobre o sólido submetido a secagem. Demais propriedades termodinâmicas podem ser observadas na carta psicrométrica, uma importante ferramenta para o cálculo em processo de umidificação e secagem. (PERRY E CHILTON, 1973)

O ar sendo responsável pela realização da secagem convectiva carrega consigo o vapor da água, este que depende da concentração da mesma para evitar precipitação. O líquido deve ser aquecido a uma temperatura em que a sua pressão de vapor é igual ou maior que a pressão parcial do gás de secagem. Durante o processo é importante manter o ar o mais próximo possível da curva de saturação, porém, não atingi-la. Esta se caracteriza por apresentar a máxima quantidade de água que o ar pode transportar sem que haja condensação prematura.

Condições internas de secagem

As denominadas condições internas de secagem são o que reflete na velocidade de secagem, depende estritamente do sólido úmido. Nesse caso, através e sobre o sólido é onde ocorre o fenômeno de transferência simultânea de calor e massa.

Muitos mecanismos diferentes podem estar envolvidos no transporte da umidade durante o processamento, como o calor acoplado e a transferência de massa (secagem) ou difusão multicomponente de solutos e água (desidratação osmótica, salga). A água pode migrar em fases gasosa e líquida dentro de poros, dificultando significativamente o processo. Um dos interesses da modelagem dos fenômenos de transporte de massa é que se torna possível compreender, quantificar e organizar em uma hierarquia os diferentes mecanismos envolvidos no transporte de massa global e, com isso, definir a melhor estratégia para os objetivos que se almeja.

Segundo Bertrand (2007) de um ponto de vista macroscópico, os fenômenos de transporte de massa em produtos alimentares dependem principalmente da natureza das substâncias de difusão e da sua estrutura. Geralmente, o produto de interesse que se presume ser constituído por uma solução aquosa (mistura de água, sal, açúcares e outros componentes solúveis) retida dentro de uma rede tri-dimensional sólida mais ou menos deformável é considerado componente não solúvel (chamados de matéria seca). Do ponto de vista teórico, os fenômenos de transporte de massa para o sistema de multicomponentes podem ser modelados utilizando fisicamente três abordagens diferentes:

- a generalização da lei de Fick ;
- a utilização de termodinâmica irreversível;

- A utilização da equação de Stefan-Maxwell.

Estas três abordagens são, respectivamente, com base na cinética, termodinâmica e considerações hidrodinâmicas.

A transferência de calor pode ocorrer de três maneiras: condução, convecção e irradiação, existem um predomínio da forma com que o calor é trocado dependendo do equipamento e do formato do sólido. O coeficiente de transferência de calor depende principalmente da velocidade do ar. Ambas as funções de transferência são estabelecidas por meio de experimentos de secagem. O ar e o material, que migram através de conexões superficiais são caracterizados pela sua temperatura e teores de umidade. Assim, cada ligação onde há calor e rede de transferência de massa está associada a uma temperatura e varia com o teor de umidade. O mecanismo de transferência de calor e a rede de transferência de massa podem ser representados por um bloco, como mostrado na Figura 2.7. (SEBASTIAN et al., 1996)



Figura 2.7 – Modo de transferência de calor e massa.
Fonte: Adaptado de Sebastian et al. (1996).

A massa se movimenta de acordo com o formato e forma do sólido, podendo se locomover por difusão ou capilaridade internamente e existindo até uma dinâmica de vaporização e condensação consecutivas até atingir a superfície do sólido e sendo arrastado pelo agente de secagem. Numerosas obras lidam com a modelagem da transferência de massa entre um produto e seu ambiente circundante e o transporte de massa no interior do produto em particular durante a secagem. Waananen et al. (1993) relataram uma lista de mais de 150 modelos matemáticos desenvolvidos entre 1907 e 1992 para a modelagem de transporte de massa em sólidos porosos durante a secagem.

Local de secagem

O local onde o material sofre o processo de retirada de umidade possui características peculiares e esta de acordo com o tipo de sólido, podendo ser encontrado os tipos: Estático, cinético, fluidizado e diluído. O leito estático possui como característica a permanência das partículas sem movimento, o leito do tipo cinético diferentemente já causa movimento das partículas no seu interior, o tipo fluidizado mantém os particulados em condição expandida sustentando-as através de força da arraste do gás de secagem e a forma diluída mantém as partículas separadas o que impossibilita a influência de uma partícula sobre a outra. (PERRY e CHILTON 1973)

Outro aspecto importante está relacionado com a forma como o gás, agente de secagem, entra em contato com o material sólido, podendo o gás manter uma corrente paralela ou perpendicular. Quando o gás atravessa o leito de forma paralela é possível encontrar as configurações concorrentes, na direção de saída do produto, contra corrente ou de fluxo cruzado. No escoamento perpendicular o gás pode se barrar no sólido, atravessar os sólidos ou arrastar o sólido e, conseqüentemente, o excesso de umidade. Para a melhor escolha da configuração entre gás e sólido deve-se levar em consideração uma adequada exposição entre a superfície do sólido e do gás e, também, as características do sólido como: Superfície de contato entre o equipamento e o gás, tamanho e peso das partículas. (PERRY e CHILTON, 1973)

SECAGEM DE ALIMENTOS

As características dos alimentos são muito influenciadas pela umidade contida nas mesmas. A estabilidade do produto é de especial preocupação, pois muitas reações químicas e enzimáticas (ou seja, a oxidação, escurecimento) são dependentes da água. A maioria dos processos utilizados pela indústria de alimentos utiliza-se de transferência de umidade no processamento, muitas vezes juntamente com transferência de calor (ou seja, refrigeração, congelamento, cozimento, envelhecimento, salga, e principalmente a secagem). Esses processos devem ser otimizados para reduzir os custos operacionais e maximizar a qualidade do produto. (RUIZ-CABRERA et al., 2005).

A secagem dos alimentos por convecção é comumente aceita como um processo em que o agente convectivo (geralmente o ar) aquece a superfície dos alimentos, este calor produz a evaporação da água e o excesso produz um aumento da temperatura do produto, como consequência da condução de calor no sólido e difusão da água dentro dos alimentos. (GARCÍA-ALVARADO et al., 2014)

Bruin e Luyben (1980) evidenciaram três tipos de problemas na secagem de

produtos alimentícios:

- Alterações do produto durante a secagem: os produtos alimentícios dependem da temperatura, da atividade química e do tempo de secagem. O processo de desidratação influencia na qualidade dos alimentos sob vários aspectos, dentre os quais a ocorrência de conversões químicas e mudanças físicas no alimento durante este período;
- Aspectos físicos e matemáticos do processo de secagem: o conhecimento dos fenômenos de transporte e das propriedades termofísicas e de equilíbrio termodinâmico, habilitam a interpretar o comportamento da secagem de materiais como uma função do tempo;
- Otimização do processo de secagem: os secadores são selecionados e projetados de tal modo a fornecer a melhor combinação de custo e qualidade, pois no custo da secagem, o consumo de energia é um dos fatores principais.

EQUIPAMENTO DE SECAGEM

Atualmente, o mais importante em setores industriais, com a exceção de produzir produtos de alta qualidade para os mercados, é aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção. Em geral, a produção de produtos agrícolas e industriais estão relacionados com a secagem, quer por um método natural ou utilizando energia a partir de outras fontes, resultando em uma menor taxa de produção ou de produtos de alto custo (KUSTUREE et al., 2010).

De modo geral, a indústria quando necessita de equipamento próprio para obter o produto desejado, com a umidade pré-estabelecida, encontra no mercado uma infinidade de equipamentos, com as mais variadas formas e características singulares. Estas dependem do processo e das condições, tais como: a temperatura da câmara de secagem, pressão, a velocidade do ar (se o gás de transporte é o ar), a umidade relativa e o tempo de retenção do produto. Todas essas características devem ser determinadas de acordo com a alimentação, produtos, propósito e método. A secagem utiliza intensivamente energia de processo, com o valor de consumo de 10% a 15% do total de energia disponível, em todas as indústrias dos países desenvolvidos (ERBAY, 2010).

Análise e seleção do equipamento

A seleção do tipo de secador é uma das áreas de estudo mais complexas e mal entendidas em tecnologia de secagem. Tem sido amplamente negligenciado na literatura, devido à dificuldade em definir quantitativamente um modelo ideal. Há um grande número de tipos de secadores disponíveis dentro de cada característica de processo. O requisito básico para o secador é que deve atingir uma relação necessária de secagem em um tempo aceitável, ser capaz de manusear o material e produzir, com qualidade,

um produto aceitável. Além disso, o equipamento deve possuir um tamanho adequado e custos proporcionais à indústria que o possui e que atende toda a segurança e requisitos ambientais relevantes. (KEMP e BAHU, 1995)

O produto de certa forma, levando em consideração suas características, molda o tipo de equipamento necessário. O projeto em si do equipamento deve levar em conta alguns fatores como:

- Cinética de secagem;
- Variação das condições ao longo do secador;
- Área de transferência térmica;
- Configuração do escoamento do gás;
- Variáveis de operação;
- Fator financeiro.

Kiranoudis (1996) em seu trabalho indica tópicos relacionados a estratégia de projeto para um tipo de secador estudado. Dado um determinado produto com uma vazão pré-definida, uma umidade inicial desejada, sob restrições impostas pela termodinâmica, construção, raciocínio e qualidade do produto, os seguintes tópicos devem ser determinados:

- A configuração ideal, quando esta não é clara, elementos transportadores, seções de secagem, bem como o número de câmaras por secção em estrutura de fluxograma;
- O dimensionamento adequado dos equipamentos e características de construção;
- Os melhores pontos de ajuste de controladores (condições operacionais).

Veladat (2013) realizou um estudo que apresentou uma análise bidimensional da transferência de calor e massa durante o processo de secagem de massas com distribuições em estado estacionário de velocidade e temperatura do ar que flui em torno da massa. Usando esses perfis e estes valores, a solução do calor acoplado e equações de transferência de massa dentre os efeitos das condições operacionais, tais como a velocidade, temperatura e a umidade relativa do fluxo de ar foram estudadas juntamente com a velocidade de secagem da massa. A análise dos resultados mostrou que os efeitos da temperatura e do ar sobre a taxa de secagem são mais importantes do que o efeito da velocidade do ar.

A quantidade necessária de energia para secar um determinado produto depende de muitos fatores, como umidade inicial, conteúdo em umidade final desejada, a temperatura do ar de secagem e velocidade. Para otimização da estrutura de um sistema de energia, há a necessidade de desenvolver primeiro um modelo do sistema. Por isso, um melhor

conhecimento da cinética de secagem poderá melhorar o projeto e a operação de forma eficiente de modo a economizar energia. (LIU X. et al., 2009)

Vários materiais que submetidos a uma secagem na produção industrial requerem abordagem diferentes para este processo. Em muitos casos, o tempo de secagem torna-se importante por causa da taxa de produção. Em outro caso, o tempo é menos importante, mas a qualidade dos produtos, isto é, o seu aspecto e bom estado mecânico ou o valor biológico, no caso de produtos alimentares ou medicamentos. Em todos os casos, é importante a minimização do uso de energia sendo este processo demorado. Para cumprir esses requisitos, é preciso uma análise em métodos especiais de secagem, ou seja, para métodos combinados em que são utilizadas diferentes fontes de fornecimento de energia. (PROMMAS, 2012)

Segundo Silva (1995) o consumo de energia para a concentração da gelatina por meios térmicos é muito maior para o processo de secagem em comparação a outros como observa-se na Tabela 3.1.

Evaporador simples efeito	110-120
Evaporador triplo efeito	30-40
Secador esteira	240-350

Tabela 2.1 – Consumo de energia Base: (kg vapor/kg água evaporada).

Simulações numéricas do funcionamento de um secador são geralmente realizadas utilizando equações diferenciais, incluindo balanços de massa e energia e funções de transferência. As funções de transferência envolvem termos experimentais, tais como a taxa da umidade evaporada ou o calor transferido. A taxa depende da temperatura média, teor de umidade ou a velocidade do ar e tudo isso pode variar em função das características do produto. (SEBASTIAN et al., 1996)

Tipos de secadores

A família mais popular de secadores é a que envolve a secagem convectiva, dessa forma o calor sensível do agente de secagem é fornecido à superfície do material, por convecção. O agente de secagem que flui passado ou através do corpo remove a água evaporada e transporta-a para fora do secador. Esse modelo de secagem inclui três tipos básicos de secador: correias transportadoras, leito fluidizado e rotativo. A secagem por convecção se aplica a praticamente a todos os setores da indústria química, envolvendo desidratação de materiais que vão desde produtos alimentícios a minerais inorgânicos. (KIRANOUDIS, 1996)

Um secador de correia transportadora é constituído por câmaras de secagem

colocadas em série. O melhor desempenho é conseguido quando estas câmaras são agrupadas em seções de secagem com características diferenciadas. Todas as câmaras numa dada seção de secagem estão equipadas com uma correia transportadora comum, um equipamento aquecedor de ar, ventiladores e vapor, operando para aquecer os trocadores de calor. (KIRANOUDIS, 1996)

É prática comum que dentro de cada câmara, a temperatura e a umidade do fluxo de ar de secagem sejam controlados. Em secadores que possuem leito fluidizado, a fase sólida é completamente dispersa em partículas numa corrente de gás que flui verticalmente como uma consequência do efeito de flutuação do gás. Devido à agitação no leito fluidizado, uma boa mistura da fase sólida é normalmente conseguida. A fluidização existe quando a velocidade superficial do gás varia entre dois valores extremos correspondentes a suspensão e efeitos de arrastamento. Geralmente, a temperatura da fase sólido-gás é controlada por meio da válvula de vapor. Em secadores rotativos contínuos, os sólidos granulares de escoamento livre são passados através de um cilindro rotativo e são regados por um gás quente em movimento, geralmente contracorrente com a fase sólida (KIRANOUDIS, 1996).

SECAGEM DA GELATINA

A gelatina se caracteriza por apresentar um formato cilíndrico cujo comprimento é muito superior ao seu diâmetro. Nesse caso, requer cuidados a serem submetidos no processo de secagem. É necessário um suporte que mantenha o produto fixo e que ao mesmo tempo movimente-o, esse material é altamente sensível à temperatura podendo se liquefazer a qualquer momento. Possui capacidade calorífica de acordo com Skuratov (1946) de 1192 J/kg K.

Secadores projetados para a gelatina são do tipo túnel, contendo uma esteira de transporte, pelo fato de o produto exigir suporte devido sua fragilidade e um processo de secagem lento com temperaturas amenas e controláveis. Industrialmente, o processo é estacionário e o funcionamento é intermitente, uma indústria de gelatina não para, nesse caso o secador é o equipamento principal que coordena toda a fábrica. As características térmicas da gelatina exigem que o secador seja subdividido em câmaras independentes para que o perfil de temperatura de secagem seja crescente, apropriado para a gradativa redução de umidade da gelatina (NEITZEL, 1990).

Um extrusor alimenta a esteira com os filamentos cilíndricos úmidos (70% em base úmida) de gelatina de maneira uniforme, fazendo com que a camada de gelatina sobre a esteira tenha uma espessura não superior a 15 cm. O secador de esteira industrial se encontra instalado na parte superior de um túnel, longo o suficiente para acomodar câmaras de secagem consecutivas e isotérmicas, com área de secagem de 16,6 m² e comprimento

aproximadamente de 4,15 m cada uma. A gelatina permanece não mais que 18 minutos em cada câmara de secagem.

Existe uma dificuldade adicional em secar a gelatina devido ao efeito da temperatura sobre o gel, para umidades elevadas, o ponto de fusão é baixo, da ordem de 30°C e cresce à medida que o teor de umidade diminui. Isto gera a necessidade de o secador operar com um perfil de temperatura crescente, que se adequa à redução de umidade da gelatina conforme a evolução do processo em si (NEITZEL E MASSARANI, 1987). Dessa forma justifica-se a divisão do secador em câmaras.

Existe uma tendência da gelatina se liquefazer durante a etapa inicial de secagem, gerando a formação de uma crosta seca na superfície, a gelatina não poder ser submetida a temperaturas elevadas e repentinas, visto que isto pode ocasionar perdas de algumas das suas propriedades. (SILVA, 1995) Cada câmara possui características particulares, dentre elas a variação de temperatura de uma para outra e a forma como é insuflado e retirado o ar. O fluxo de ar, agente de secagem, é transversal ao produto mantendo com isso, um contato maior entre o ar e o produto. O processo se caracteriza por ser lento e gradual, segundo Neitzel (1987) existem duas fases:

Fase 1: O processo é controlado pela resistência à transferência de massa da superfície do sólido.

Fase 2: A gelatina atinge o valor da umidade crítica e nesse ponto o processo é controlado pela difusão da água no interior, sendo que a partir da umidade crítica a secagem é altamente dependente dos mecanismos de transferência de calor.

Observa-se na Figura 2.8 o comportamento característico da curva de secagem da gelatina.

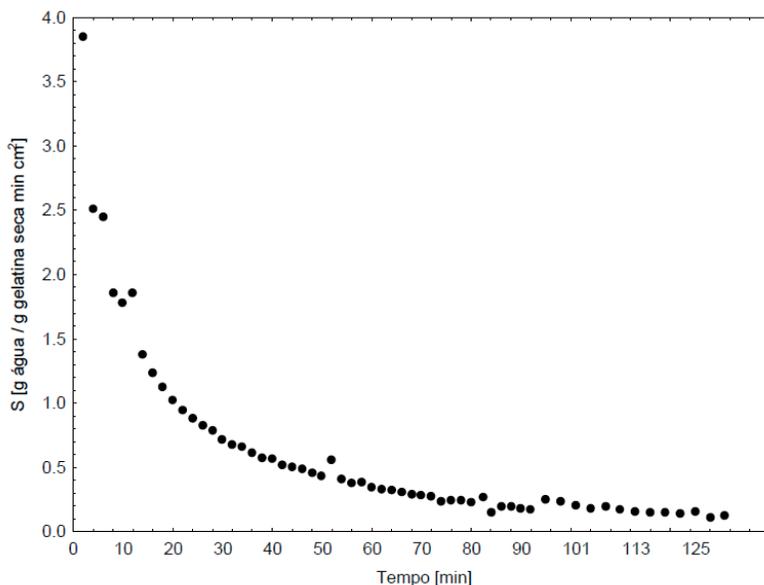


Figura 2.8 – Curva de secagem típica da gelatina.
 Fonte: Corazza et al. (2003).

Bertoli e Neitzel (1987) realizaram a simulação de um secador de esteira e observaram que, quando a gelatina apresenta-se com baixas umidades, em torno dos 10% em base seca, a tendência da curva se dispersa, há a presença de inúmeros pontos sem uma tendência lógica, descaracterizando uma curva teórica de secagem. Este fato os levou à realização de avaliações mais rigorosas, relacionadas aos parâmetros tomados como referência em sua modelagem, tal como a condutividade térmica da gelatina, o coeficiente de difusão e o encolhimento.

Uma vez que a gelatina deve ser seca lentamente, uma propriedade importante é a condutividade térmica, que é uma função da umidade, dando condições de, em cada câmara de secagem, submetê-la a temperaturas que facilitem a difusão da umidade do seu interior para o exterior, sem causar danos ao processo e, principalmente, ao produto, evitando que ocorra amolecimento ou fissura dos *noodles*. (SOUSA, 1996)

Quando uma película fina de gelatina inicialmente hidratada é deixada exposta para secar a partir da superfície, alterações na estrutura superficial do material e as propriedades mecânicas locais na região de secagem ocorrem. O filme é simultaneamente submetido a grande deformação (acima de 20%), um padrão periódico de rugas aparece sobre a superfície da gelatina ao longo do comprimento da amostra na direção da força aplicada. Estas rugas são distribuídas uniformemente sobre a superfície da gelatina, o que muda com a composição da amostra. (RIZZIERI et al., 2006)

Ao passar pelas câmaras (1 a 10), a gelatina é seca com fluxo de ar quente transversal ao seu leito. O sentido do fluxo de ar é indicado pelas setas na Figura 2.9. O ar usado para secar a gelatina é previamente filtrado e desumidificado na Central de Tratamento de Ar (CTA) por processos de compressão e liquefação da umidade utilizando como fluido de processo a amônia. Ao passar de uma câmara para outra, ele é aquecido por um trocador de calor. Dessa forma, sua umidade relativa diminui, aumentando o potencial de secagem e o gradiente para a transferência de massa. (CORAZZA et al., 2003)

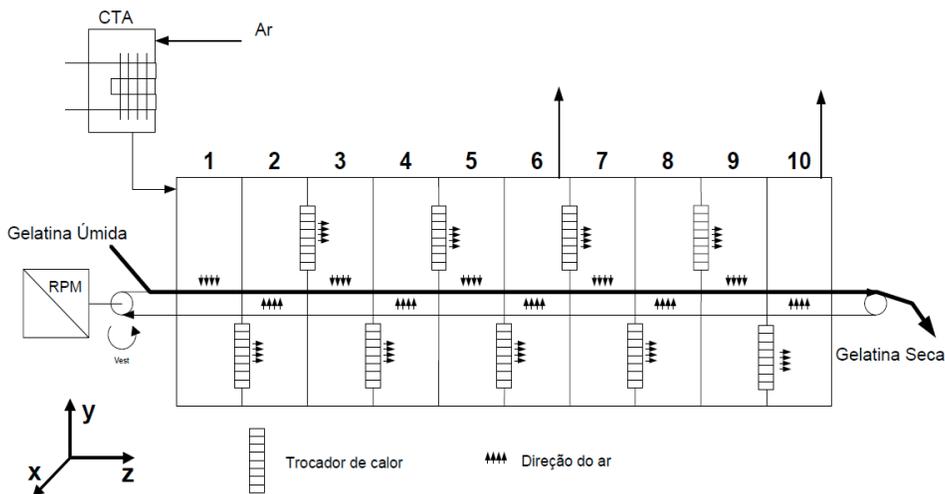


Figura 2.9 – Esquema de um equipamento de secagem.
Fonte: Corazza et al. (2003).

Ao longo do processo, a porosidade do leito varia tornando-se menor ao longo do equipamento, pois ocorre a contração do produto que segundo Neitzel (1987) o valor médio é de 0,53. Porém, a porosidade do leito de gelatina não é constante ao longo do secador, uma vez que, conforme a gelatina seca, ocorre uma contração no volume do leito poroso.

Dentre os parâmetros acerca da cinética de secagem da gelatina Krischer e Kast (1978) determinaram o seguinte valor para a umidade crítica da gelatina $X_c = 1,80$ (kg de água/kg sólido seco) e Gregg e Sing (1967) determinaram a umidade de equilíbrio da gelatina em $X_{mx} = 0,095$ (kg de água/kg sólido seco). Há uma grande mudança do aspecto do produto ao longo das câmaras, na saída do equipamento a gelatina se apresenta rígida e imediatamente após é submetida ao processo de moagem e reduzida a particulados. Estes particulados posteriormente são submetidos a separação de acordo com seu diâmetro e armazenados para a comercialização.

PROJETO E OTIMIZAÇÃO DO SECADOR

Kiranoudis et al. (1998) desenvolveram um modelo matemático apropriado para

o projeto e otimização de secadores do tipo esteira transportadora. O objetivo do projeto foi a avaliação da estrutura ideal em formato de fluxograma, características construtivas e condições operacionais. A metodologia adotada baseou-se na construção de uma superestrutura que envolve um grande número de estruturas secundárias, e otimizá-lo por meio de técnicas de programação matemática não-linear.

Prommas (2012) destaca, para uma análise de otimização, a análise exergética, sendo as características de exergia identificada devido à sua importância em uma vasta gama de aplicações. A análise exergética tem sido cada vez mais utilizada como uma ferramenta útil na concepção, avaliação, otimização e melhoria de sistemas de energia. Ela pode ser aplicada sobre ambos os sistemas e níveis de componentes. Esta análise leva a uma melhor compreensão das influências da termodinâmica e fenômenos ligados ao processo, comparação de importantes e diferentes fatores termodinâmicos, e a determinação das formas mais eficazes de melhorar o processo.

Para Erbay (2009), a análise exergética é uma ferramenta que pode ser utilizada com sucesso na criação e simulação de sistemas de energia e fornece as informações necessárias para a escolha do projeto dos componentes apropriados e o procedimento de operação do equipamento. Esta informação é muito mais eficaz para determinar na planta o custo de funcionamento, a conservação da energia e do combustível utilizado.

SECADOR CONVECTIVO DO TIPO ESTEIRA

As características operacionais de projeto de secadores tipo esteira, constituem um importante campo da engenharia de processo, que ainda é regido pelo empirismo. Kiranoudis (1998) aborda aspectos que foram estudados de forma direta com base no raciocínio matemático que descreve o processo de secagem por convecção. Procedimentos de projeto que visam a determinação do equipamento ideal, arranjo, tamanho e as características operacionais para secadores do tipo esteira foram realizados por meio da otimização do custo total anual de cada arranjo de equipamento para uma dada capacidade de produção.

Segundo Bohner (2013), o problema da secagem irregular ao longo da largura da correia em secadores do tipo esteira é uma consequência da distribuição do ar inadequada, levando à diminuição da taxa de transferência de calor e massa. O problema foi descoberto na distribuição do ar em ambos os lados do secador, em virtude do ângulo incorreto de uma aba de distribuição ajustável. Quando o ângulo foi ajustado para 45°, os fluxos de massa de ar de ambos os lados tornaram-se iguais. Além disso, a distribuição de ar através da correia não era homogêneo observado por meio de estudo em medições da temperatura do ar e do produto, e a distribuição de sua umidade. O estudo resultou num fluxo de ar otimizado e

uma melhoria significativa no processo.

Jensen (2011) propôs um modelo empírico para controlar a umidade de saída do produto de um secador de correia transportadora. O modelo empírico é aplicado de modo a influenciar a variável de controle de umidade com base nas leituras temporárias virtuais de temperatura na matéria prima de entrada no secador. O sistema utiliza um controlador proporcional, integral e derivativo (PID), que manipula a velocidade da correia transportadora para manter o teor de umidade de saída entre 0,024 e 0,034 em base seca. Os parâmetros do modelo do sensor sintoniza um conjunto de cerca de 2000 dados experimentais de temperatura da superfície e o teor de umidade das folhas de mate. Estes resultados surgiram do lote de experimentos de secagem com temperatura entre 70°C e 120°C para até 9600s, utilizando folhas com teor inicial de umidade variando de 0,14 a 1,7 em base seca.

Segundo Veladat (2013) o investimento e os custos operacionais básicos do processo de secagem são altos. A tentativa do método usado, de modelagem matemática, proposto por ele para projetar secadores industriais e ter acesso a adequada condição operacional é demorado e caro. Neste contexto observa-se que os efeitos de diferentes parâmetros de tempo e eficiência de secagem tem sido de grande interesse nos últimos anos.

METODOLOGIA

A análise do equipamento consiste na caracterização do equipamento em termos de perfil de temperatura e umidade por câmara por coleta de dados in loco. A análise de redimensionamento consiste em determinar os efeitos das variações do comprimento, da velocidade da esteira e do tempo de secagem. Utilizando um modelo de Equação diferencial e solução numérica determina-se o efeito da velocidade da esteira em função da umidade e nas temperaturas de 30°C, 40°C e 52°C. Por meio do balanço de massa determina-se a quantidade de remoção de água do material sólido e o perfil de umidade do ar por câmara. Do balanço de energia simula-se as necessidades energéticas e o consumo de vapor. Na análise de eficiências em termos de transferência de calor e massa determina-se o coeficiente convectivo de transferência de calor e massa por câmara.

ANÁLISE DE REDIMENSIONAMENTO E CONDIÇÕES MECÂNICAS OPERACIONAIS

Existem variações do equipamento em termos operacionais e de projeto, porém, dentre os equipamentos observados podem-se destacar em comum: dimensões das câmaras praticamente idênticas, largura da esteira transportadora basicamente idêntica com as dimensões do comprimento de cada câmara e tempo de secagem semelhante aos ensaios laboratoriais.

Pelo processo iterativo utilizando a linguagem Visual Basic simulou-se o comprimento total do equipamento em função do tempo de secagem para os respectivos três casos. Os tópicos 3.1.1 a 3.1.3 descrevem parâmetros próximos ao equipamento real e são utilizados como forma de obter resultados comparativos operacionais do equipamento.

Comprimento do secador por tempo de secagem

Considera-se

- Vazão mássica constante igual a 2450 kg/h;
- Altura inicial do leito de secagem de 0,05m;
- Densidade média da gelatina de 817,6 kg/m³ correspondente a média ponderada da densidade da água em 70% (1000kg/m³) e 30% (392kg/m³) da gelatina seca;
- Largura do equipamento de 4m.

Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito

Considera-se

- Vazão mássica constante igual a 2450 kg/h;
- Densidade média da gelatina de 817,6 kg/m³ correspondente a média ponderada da densidade da água em 70% (1000kg/m³) e 30% (392kg/m³) da gelatina seca;
- Largura do equipamento de 4m;
- Tempo de secagem de 252min.

Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da vazão mássica

Considera-se

- Densidade média da gelatina de 817,6 kg/m³ correspondente a média ponderada da densidade da água em 70% (1000kg/m³) e 30% (392kg/m³) da gelatina seca;
- Largura do equipamento de 4m;
- Tempo de secagem de 252min.

EFEITO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA NO PROCESSO DE SECAGEM

Na Figura 3.2 considera-se o elemento infinitesimal que traduz os dois fenômenos ocorrendo de forma simultânea. O sólido se movimenta na direção da esquerda para a direita e há penetração de ar seco e aquecido através dos espaçamentos da esteira. Conforme o sólido se aquece se desprende umidade do interior do sólido e percorre do centro para a superfície. Conforme o processo se desenvolve a umidade na forma de vapor se desprende da superfície do sólido e é retirada pelo ar de secagem que neste caso aumenta sua umidade.

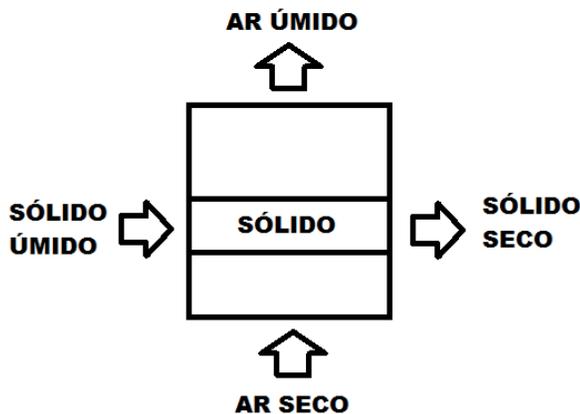


Figura 3.2 – Secagem de um elemento infinitesimal.
Fonte: Autoria própria.

Serão admitidos como hipóteses simplificadoras os seguintes tópicos:

- Escoamento do gás em uma dimensão e de forma transversal
- Escoamento do sólido em uma dimensão e na direção axial
- Tempo de residência médio do material que atravessa o secador constante
- Existe transferência de calor por convecção e condução, porém a troca térmica relacionado a radiação será desprezada
- Transferência de massa é estritamente da fase sólida para fase gasosa
- Transferência de água do gás para o sólido é desprezível
- A perda de carga em todas as fases do processo é desprezível
- O material úmido possui homogeneidade em sua extensão
- O calor específico do sólido possui dependência com a umidade
- O calor específico do ar possui dependência com a temperatura
- Será admitido o gás de secagem como gás ideal
- A velocidade da esteira é constante ao longo do processo
- Temperatura e umidade da fase sólida é função da coordenada x
- Temperatura e umidade da fase gasosa é função da coordenada z
- Perda de calor para o ambiente externo é desprezível

Considerando o elemento infinitesimal da Figura 3.2 assume-se o seguinte balanço:

[Umidade do sólido no elemento infinitesimal t]t – [Umidade no sólido no elemento infinitesimal no tempo t+Δt] = -[Umidade que entra no elemento infinitesimal em x]x + [Umidade que sai do elemento infinitesimal em x+Δx] – [Umidade evaporada]

Traduzindo em termos de equação:

$$M_s \cdot X_s|_t - M_s X_s|_{t + \Delta t} = -\dot{M} X_s \Delta t|_x + \dot{M} X_s \Delta t|_{x + \Delta x} - \dot{M} R \Delta t \quad (3.5)$$

$$R = R(X_s, t) \quad (3.6)$$

Em que:

M_s é a massa do sólido úmido; \dot{M}_s : Taxa mássica do sólido úmido; X_s é a umidade contida no sólido; t é o tempo e R é a taxa de secagem

Sendo a taxa mássica de secagem dada pela Equação 3.7.

$$\dot{M} = \rho_s A s u \quad (3.7)$$

Em que:

ρ_s é a massa específica do sólido; A_s é a área superficial de contato com o gás de secagem e U é a velocidade axial do sólido.

Substituindo as equações 3.6 e 3.7 em 3.5 e dividindo a nova expressão por $\Delta x \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$

Chega-se a seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial X_s}{\partial t} = -u \frac{\partial X_s}{\partial x} - R \quad (3.8)$$

Em que:

X_s é a umidade do sólido (g.água/g.sol.seco); x é a distância a partir da entrada do equipamento (m); u é a Velocidade da esteira (m/s) e R a Taxa de secagem (g.água/g.sol.seco/s)

A esteira transportadora de sólidos úmidos mantém uma velocidade constante, porém, caso esta velocidade seja modificada existe a possibilidade da diminuição do comprimento do equipamento o que poderá levar ao aumento de produção. Será simulado o efeito da velocidades da esteira em 6m/s, 12m/s, 18m/s e 24m/s em função das temperaturas 30°C, 40°C e 52°C em função da umidade retirada de cada câmara por solução numérica, em 100 pontos da equação de balanço mássico da Equação 3.8.

BALANÇO DE MASSA

O cálculo é realizado como uma forma de comparar a situação real e determinar o desempenho do equipamento e como consequência, poderia levar a um aumento de produtividade e redução de gastos energéticos. Também inclui a possibilidade de geração de inúmeros cenários o que acarreta a possibilidade de um aumento de vazão sem necessariamente modificar as características de construção do equipamento. Para um dado volume de controle, a equação geral é apresentada pela Equação 3.4. Será simulada a remoção da água por câmara em regime estacionário.

$$\frac{d(m)_{vc}}{dt} + \Delta(\dot{m})_{cor} = 0 \quad (3.8)$$

Em que:

Cor são as correntes de processo; m é a massa do volume de controle (kg) e \dot{m} é a vazão mássica da corrente de processo (kg/s)

PERFIL DE UMIDADE DO AGENTE DE SECAGEM

O ar como agente de secagem possui uma limitação em termos de retirada de umidade, nesse caso, é necessário um gradiente de concentração. Para uma dada vazão simula-se a umidade relativa ao longo do secador representando o potencial em cada câmara para retirar a umidade excedente. A umidade absoluta é dada pela Equação 3.9, sendo as temperaturas de bulbo seco as operacionais do equipamento.

$$U(T, T', p) = 10^{-\left[c_1 + \frac{b_1}{T+d}\right]} \cdot (T+d)^{-a_1} \left[10^{\left(c + \frac{b}{T+d}\right)} (T'+d)^a - (f + gT')p(T - T') \right] \quad (3.9)$$

Em que:

T é a temperatura do bulbo seco (K); T' é a temperatura de bulbo úmido (K); p é a pressão (Atm); a=-4,9283; b=-2937,4; c=23,5518; d=273,15; f=0,00066; g=7,57x10⁻⁷; k=0,21668; a1=-4,9283; b1=-2937,4; c1=2355,18

Pelo balanço de massa, obtém-se a umidade absoluta em cada câmara, por meio da Equação 3.9, por processo iterativo, obtém-se as temperaturas de bulbo úmido e com isso o perfil de umidade relativa de cada câmara.

$$H(T, T', P) = k(T+d)^{-1} \left[10^{\left(c + \frac{b}{T+d}\right)} (T'+d)^a - (f + g \cdot T')p(T - T') \right] \quad (3.10)$$

Em que::

T é a temperatura do bulbo seco (K); T' é a temperatura de bulbo úmido (K); p é a pressão (atm); a=-4,9283; b=-2937,4; c=23,5518; d=273,15; f=0,00066; g=7,57x10⁻⁷; k=0,21668

BALANÇO ENERGÉTICO

De acordo com a primeira lei da termodinâmica o balanço de energia para o volume de controle é descrito pela Equação 3.11. Considera-se regime estacionário, sem a realização de trabalho, energia cinética e potencial desprezível. De acordo com o balanço de energia obtém-se a simulação das necessidades energéticas (calor) e o consumo de vapor necessário para a realização da secagem.

$$\frac{d(mU)_{vc}}{dt} + \Delta \left[\left(H + \frac{1}{2} u^2 + zg \right) \dot{m} \right] = \dot{Q} + \dot{W} \quad (3.11)$$

Em que:

m é a massa do volume de controle (kg); U é a energia interna do volume de controle (kJ/kg); H é a entalpia da corrente de massa (kJ/kg); u é a velocidade da corrente (m/s); z

é a altura da corrente com relação a um referencial estático (m); \dot{m} : é a vazão mássica da corrente (kg/s); \dot{Q} é a taxa total líquida de calor (kw) e \dot{W} é a taxa total líquida de trabalho (kw)

A entalpia do sólido pode ser calculada utilizando a equação encontrada por Skuratov e Shkitov (1946) conforme mostra a equação 4.10.

$$H_s = (C_{ps} + XC_{pl})T_s \quad (3.12)$$

Em que:

C_{ps} é a capacidade calorífica do sólido (kJ/kg.K) e C_{pl} é a capacidade calorífica da água (kJ/kg.K)

O cálculo do calor necessário para o início da evaporação da água pode ser obtido assumindo a gelatina como um cilindro oco, com isso chega-se na seguinte Equação 3.13.

$$\dot{Q} = \left(\frac{T_{ar} - T_s}{\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k} + \frac{1}{2\pi r_o}} \right) dx \quad (3.13)$$

Em que:

k é o coeficiente de condução térmica; r_i é o raio interno do cilindro; r_o é o raio externo do cilindro e T_{ar} é a temperatura do ar de secagem e T_s é a temperatura do sólido.

O coeficiente de condutividade térmica varia em função da umidade, e por meio de um ajuste linear utilizando uma análise de mínimos quadrados, pode-se obter a partir do trabalho de Sousa (1996) a Equação 3.14.

$$k = 0,5883X_s + 0,0138 \quad (3.14)$$

Em que:

X_s é a umidade do sólido (g.água/g.sol.seco) e k é a condutividade (W/m.K)

O raio externo ao longo do processo sofre contração e nesse caso, será estimado utilizando a porosidade do leito como parâmetro variável dado pela Equação 3.15.

$$e = 1 - \rho_{ap}/\rho_s \quad (3.15)$$

Em que:

ρ_{ap} é a densidade aparente do leito e ρ_s é a densidade do sólido

Dessa forma obtém-se uma expressão para o raio externo de cada partícula de gelatina dado pela expressão combinada gerando a Equação 4.14.

$$\frac{1}{r_0} = 2\pi\rho s(1-\epsilon)dx/Ms \quad (3.16)$$

Em que:

dx é a distância a partir da entrada do equipamento e Ms é a massa de sólido

O calor latente de vaporização da água é variável com a temperatura, sendo dada pela Equação 3.17.

$$h(T) = 2508 + 2,386T \quad (3.18)$$

Em que:

T é a temperatura (K)

DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM TERMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

Através de correlações da literatura mensura-se o quanto o equipamento, em termos de transferência de massa e calor, possui de eficiência para a realização da secagem.

Parâmetros de transferência de calor e massa no equipamento

Como forma de mensurar a eficiência em termos de transferência de calor e massa utiliza-se a Equação 4.16 e 4.18 em todas as fases do processo de secagem sendo h o coeficiente de transferência de calor por convecção, k_y o coeficiente de transferência de massa por convecção e Jh o fator de Chilton e Colburn dado pela Equação 4.17.

$$hc = Jh \cdot C_{pf} \cdot G \left(C_{pf} \frac{\mu_f}{k_f} \right)^{-2/3} \quad (3.19)$$

$$Jh = \frac{2,06}{\epsilon} \cdot \left(\frac{d_e G}{\mu_f} \right)^{-0,51} \quad (3.20)$$

$$k_y = Jd \cdot G / Sc^{2/3} \quad (3.21)$$

Em que:

hc é coeficiente de transferência de calor convectivo (J/m^2Kh); C_{pf} é a capacidade calorífica a pressão constante do gás (J/kgK); G é o fluxo mássico do gás (kg de ar seco/ m^2h); μ_f é a viscosidade do gás (kg/mh); k_f é a condutividade térmica do gás (J/mKh); ϵ é a porosidade do leito; d_e é o diâmetro da esfera com a mesma área da partícula (m); k_y é o coeficiente de transferência de massa (kg água/ $m^2h\Delta Y$) e Sc é Número de Schimit do ar.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são demonstrados primeiramente determinando os dados coletados caracterizando o equipamento, realização da análise de redimensionamento, o resultado do balanço de massa e energia, a avaliação da eficiência em termos de transferência de massa e calor e a simulação do perfil de umidade ao longo das câmaras.

CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO INDUSTRIAL

O equipamento industrial consiste de 14 câmaras, cada câmara possui as seguintes características:

Câmara 1: Recebe gelatina que sai da extrusora em uma vazão de aproximadamente 2 ton/h com umidade de aproximadamente 66% em base úmida, na parte superior a temperatura se encontra a 38°C, levando uma queda de 9°C chegando a 29°C na parte inferior. O ar após atravessar a esteira de cima para baixo entra em um conjunto soprador e trocador de calor que se aquece para se preparar para a entrada da segunda câmara.

Câmara 2: Ar de secagem entra a 41°C atravessa a esteira sofre queda de temperatura de 7°C e atinge a parte superior a 34°C quando entra em um trocador de calor e logo após entra na câmara 3.

Câmara 3: A 42°C o agente de secagem atravessa novamente o leito chegando a 37°C e novamente entra em um conjunto soprador e trocador de calor para se aquecer até 46°C.

Câmara 4: Existe uma limitação por parte do agente de secagem, nesse caso é necessário um equipamento para retirar o excedente de ar que está prestes a saturar. Aqui a corrente de ar se divide em duas, uma entra em um trocador de calor para se aquecer e atingir a câmara 5 e outra a 43°C entra em um exaustor..

Câmara 5: Após atravessar o trocador de calor o ar, na parte superior, se mantém a 49°C, sofre uma queda de temperatura e entra em outro sistema trocador e soprador de ar que visa atingir a câmara 6.

Câmara 6: Após passar pelo trocador da câmara anterior, o ar a 51°C sofre leve queda de temperatura chegando a 49°C e se dividindo novamente em duas correntes.

Câmara 7: Após passar por outro trocador de calor o ambiente de secagem superior já está a 56°C, após atravessar o leito entra em outro sistema soprador e trocador de calor.

Câmara 8: Na região inferior, o sistema está a 59°C sofre leve perda de temperatura se mantendo esta câmara quase que constante a temperatura nas duas regiões.

Câmara 9 e 10: Após passar pelo trocador da câmara anterior, o ar se aquece até

62°C e novamente entra em outro sistema soprador e trocador de calor até atingir a câmara 10 e 65°C.

Câmara 11 e 12: A 68°C da parte superior, o sistema sofre leve queda de temperatura, entra em outro sistema trocador de calor e soprador.

Câmara 13 e 14: Na parte inferior o sistema se encontra a 74°C entra em um sistema trocador de calor e soprador, se divide em 2 correntes.

Câmara de resfriamento: Esta recebe gelatina já na umidade ideal para ser comercializada e somente tem a função de resfriar o produto. Também possui um exaustor que retira o ar em excesso.

As temperaturas em cada câmara dos níveis inferiores e superiores variam de equipamento para equipamento, porém, se mantém na mesma faixa de temperatura com se encontram na Tabela 5.4.

Câmara	Temperatura (°C)
1	33,5
2	37,5
3	40,5
4	44,5
5	48,5
6	50,5
7	55,5
8	58,5
9	61,5
10	64,5
11	67,5
12	71,5
13	74,5
14	77,0

Tabela 4.1 – Perfil de temperatura média em cada câmara.

Na Figura 4.1 observa-se o perfil de umidade ao longo das câmaras, o que se assemelha com o perfil dos ensaios de secagem descritos na literatura. Com isso pode-se observar grande semelhança na dinâmica de retirada da umidade tanto nos ensaios de secagem quanto no equipamento. Nesse caso a literatura demonstra que há grande semelhança na secagem em regime de batelada e contínua.

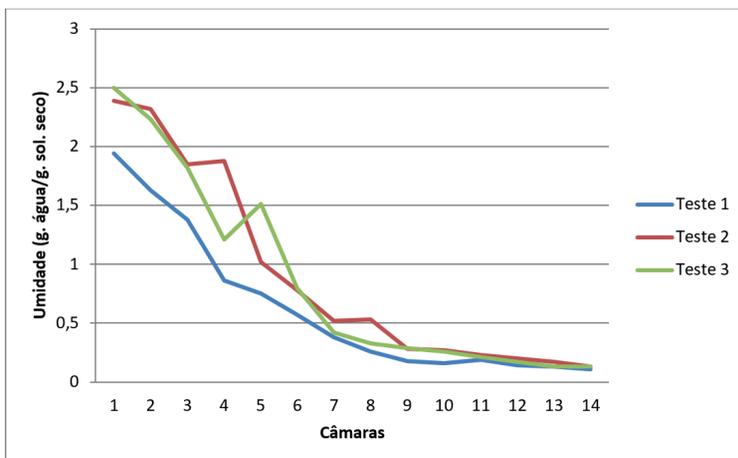


Figura 4.1 – Perfil de umidade em cada câmara do equipamento de secagem em base úmida.

ANÁLISE DE REDIMENSIONAMENTO E CONDIÇÕES MECÂNICAS OPERACIONAIS

Por meio das condições operacionais do índice 4.1 demonstra-se o comportamento das variáveis envolvidas no processo como: comprimento do secador, tempo de secagem, velocidade da esteira e comprimento do leito.

Comprimento do secador por tempo de secagem

O tempo de secagem pode variar dependendo da matéria prima e condições ambientais, sendo este um dos principais fatores para um processo eficaz de secagem. Pela Figura 4.1 fazendo uma analogia ao comprimento do secador observa-se uma dependência linear entre o comprimento do secador e o tempo.

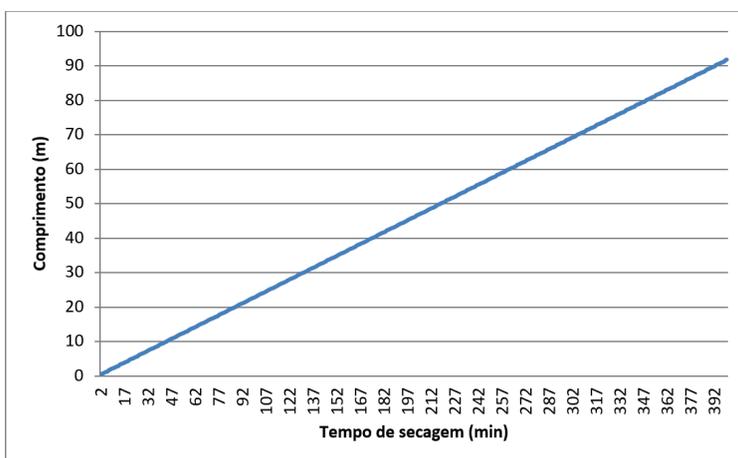


Figura 4.1 – Comprimento do secador por tempo de secagem.

Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito

Observa-se pela Figura 4.2, um gráfico de unidades distintas, que conforme aumenta-se a altura do leito de secagem existe uma aproximação entre as curvas de velocidade da esteira e do comprimento do secador de forma a diminuir as duas variáveis. Com isso, pode-se constatar que existindo a possibilidade de aumentar o leito em altura sem comprometer a secagem pode-se diminuir o comprimento do equipamento e com isso permitir a diminuição do custo de implantação.

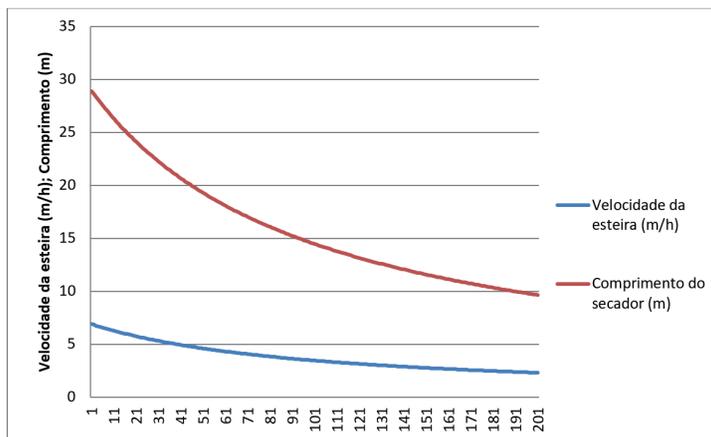


Figura 4.2 – Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito.

Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da vazão mássica

Pela Figura 4.3 pode-se demonstrar um *scale up* em termos de vazão mássica de matéria prima, a velocidade da esteira pouco se altera, porém, é necessário um grande aumento em termos de comprimento do equipamento.

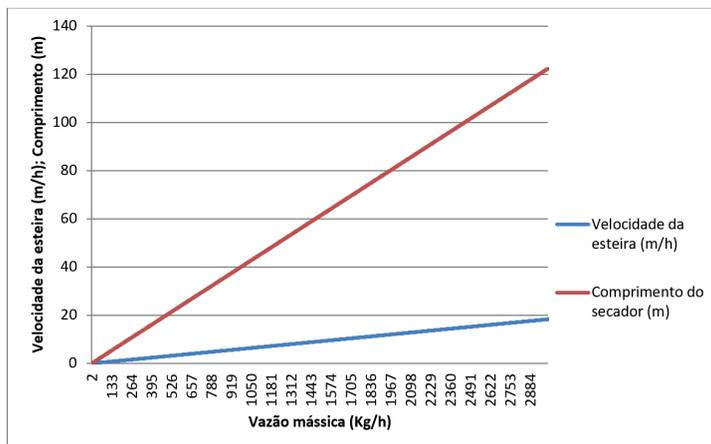


Figura 4.3 – Velocidade da esteira e comprimento do secador.

BALANÇO DE MASSA GERAL

Pelo balanço mássico observa-se grande remoção de umidade nas 3 primeiras câmaras conforme a Tabela 4.2. E com base nos resultados pode-se obter a umidade absoluta em cada câmara e com isso o perfil de umidade relativa.

Túnel	Vazão total(kg/h)	Vazão de água(kg/h)
1	2450,00	257,89
2	2192,11	208,77
3	1983,33	435,01
4	1548,33	86,92
5	1461,40	155,76
6	1305,64	158,26
7	1147,38	96,94
8	1050,44	64,64
9	985,80	17,19
10	968,60	7,82
11	960,78	8,78
12	952,00	13,94
13	938,06	15,58
14	922,48	3,05

Tabela 4.2 – Balanço material por câmara de secagem.

Dos resultados do balanço de massa e das Equações 3.9 e 3.10. (Figura 4.12) observa-se a evolução da umidade relativa, existe um aumento significativo da câmara 1 a 3 devido ao excesso de umidade e a fase de secagem se encontrar no período a taxa aproximadamente constante, em 4 observa-se uma queda considerável devido ao exaustor responsável pela retirada do ar úmido. A partir da câmara 6 existe um decréscimo da umidade relativa devido ao aumento considerável de temperatura e da necessidade de existir um grande gradiente de concentração pois é nesta fase que existe maior dificuldade em secar a gelatina.

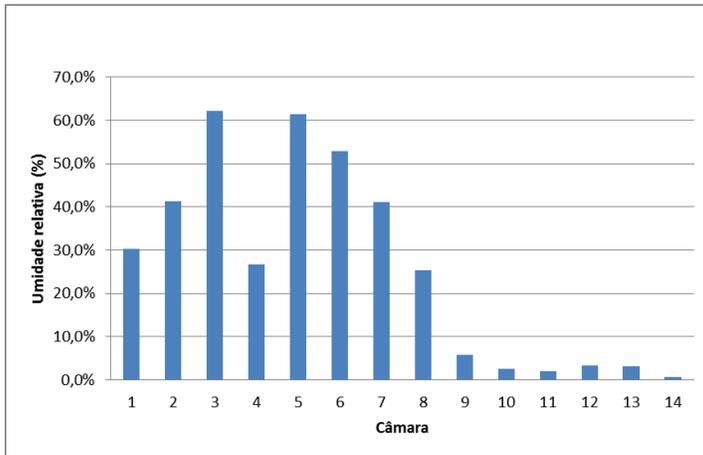


Figura 4.12 – Evolução da umidade relativa ao longo das câmaras.

EFEITO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA E DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE SECAGEM

Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, sendo a solução da Equação 4.8 observa-se, pelo resultado da modelagem, grande discrepância na quantidade de umidade retirada quando a esteira opera a baixas velocidades até 10m da entrada da matéria prima. Após 10m a eficiência em retirada da umidade não é significativa o que demonstra o grande efeito que a umidade ligada gera com relação ao processo.

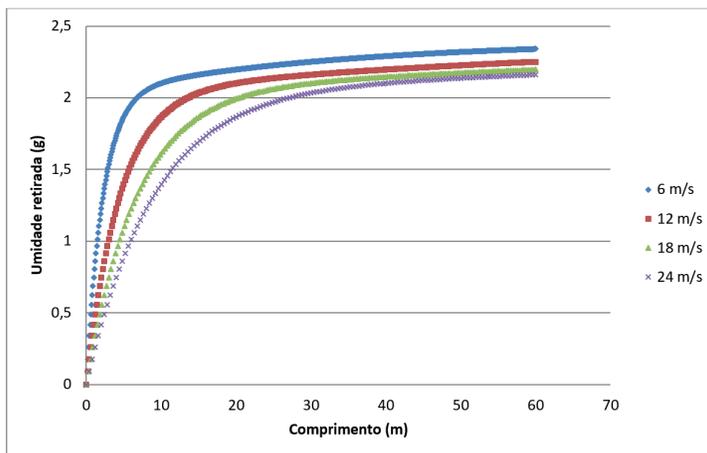


Figura 4.4 – Efeito da velocidade do sólido no processo de secagem a 30°C.

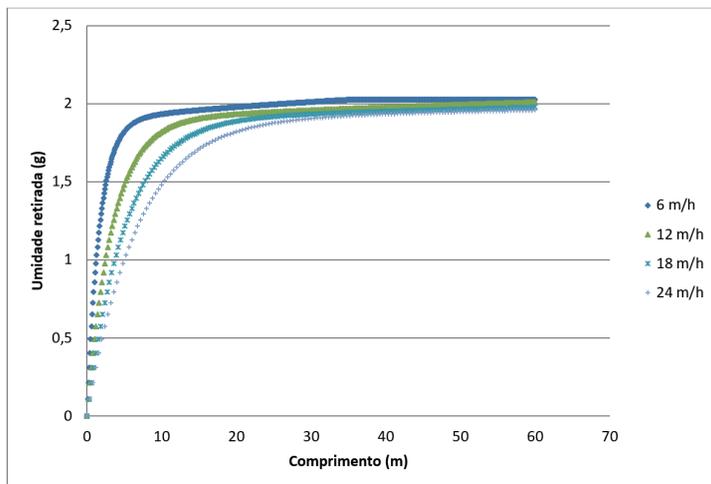


Figura 4.5 – Efeito da velocidade do sólido no processo de secagem a 40°C.

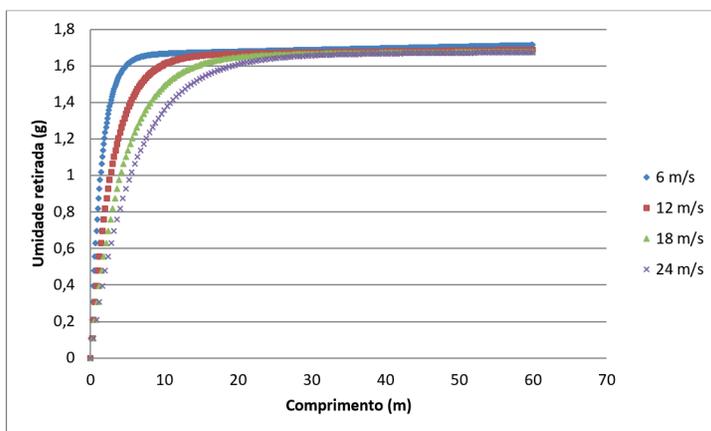


Figura 4.6 – Efeito da velocidade do sólido no processo de secagem a 52°C.

Análise das necessidades energéticas ao longo do equipamento

Pela Figura 4.7, que neste caso foi calculado a quantidade de energia necessária utilizando o modelo de gelatina oca, pode-se observar grande discrepância no período inicial de secagem entre os valores simulados e obtidos experimentalmente.

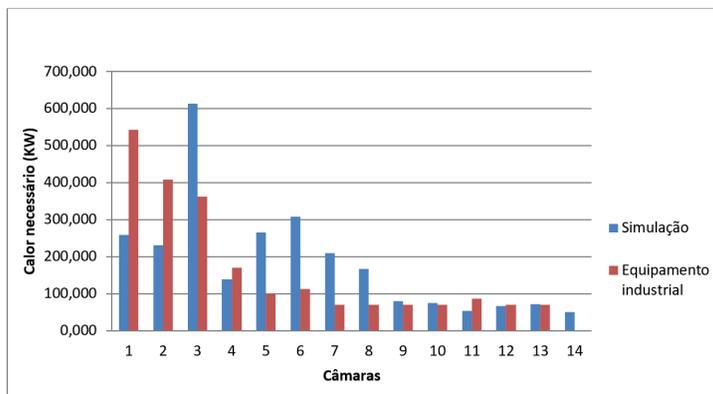


Figura 4.7 – Quantidade de calor simulada utilizando a gelatina como cilindro oco.

Pela Figura 4.8, neste caso foi calculado utilizando a Equação proposta por Skuratov e Shkitov (1946), pode-se observar o mesmo ocorrido na simulação anterior, um desprendimento maior de energia nos primeiros 3 setores de secagem.

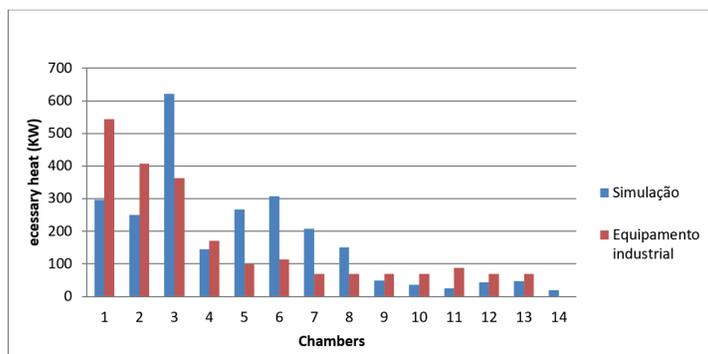


Figura 4.8 – Quantidade de calor simulada utilizando a Equação proposta por Skuratov e Shkitov (1946).

Análise do consumo do vapor

Dos resultados do balanço de energia e da Equação 3.11, na Figura 4.9, pode-se observar grande necessidade de vapor nas três primeiras câmaras, a explicação está no fato de que no início do processo a gelatina possui maior parcela da sua fração em água e nesse caso exige maior necessidade de calor para a vaporização. Após a câmara 5, exige-se menos vapor e a temperatura da câmara se conserva com uma necessidade menor de energia.

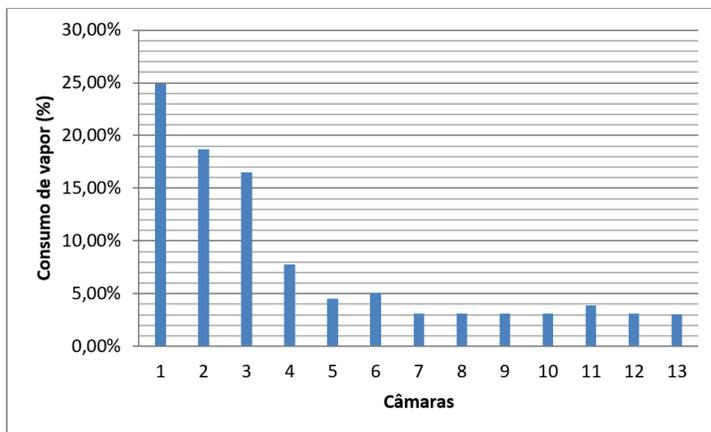


Figura 4.9 – Consumo de vapor ao longo das câmaras onde há troca térmica.

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA EM TERMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

Como resultado do cálculo utilizando as Equações 4.16 a 4.18 (Figura 5.20) pode-se observar a evolução da eficiência na transferência de calor por meio da determinação do coeficiente de transferência de calor. De acordo com a literatura, as trocas térmicas por convecção são mais intensas na parte final da secagem o que justifica maior necessidade de troca térmica. A justificativa baseia-se na dificuldade em retirar a umidade ligada no seio da matéria-prima.

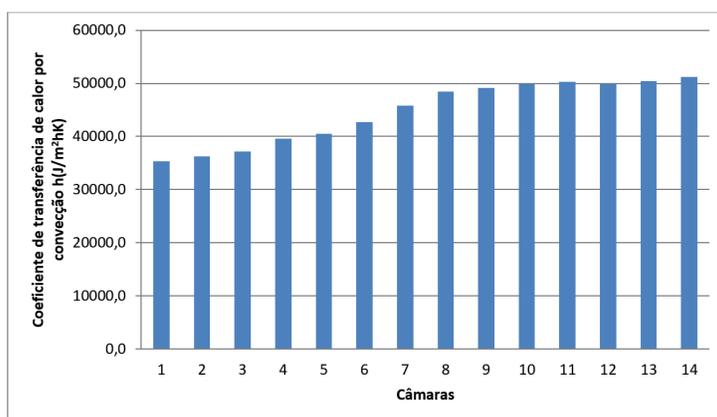


Figura 4.10 – Perfil do parâmetro de transferência de calor por convecção para cada câmara.

Pela Figura 4.11 observa-se aumento gradual do coeficiente de transferência de massa por convecção, esse efeito pode ser explicado devido a baixa concentração de água na gelatina das câmaras finais.

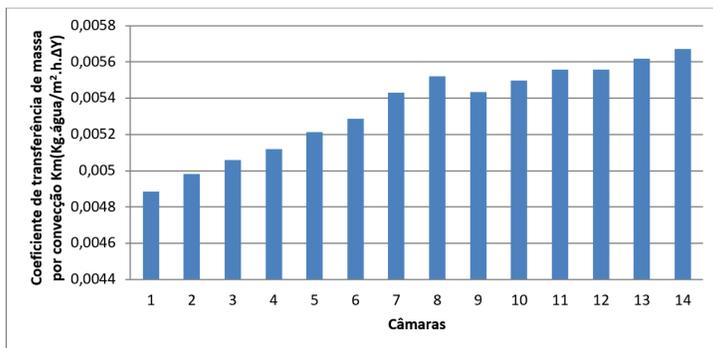


Figura 4.11 – Perfil do parâmetro de transferência de massa por convecção para cada câmara.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir sobre o trabalho que a secagem em laboratório pode representar o processo de secagem industrial e entender o comportamento dinâmico da matéria prima de acordo com as condições operacionais que podem vir a ser impostos no equipamento industrial. Observam-se, também, pontos no equipamento industrial que podem ser modificados como forma de melhorar a retirada da umidade antes das câmaras medianas, até 18min de secagem existe uma diferença de queda de umidade, de aproximadamente 70%, sendo esta uma alternativa para economia de espaço ou vapor. Também em uma análise da velocidade da esteira observa-se pouca influência da mesma, o que pode apresentar pequenas perdas de qualidade do produto final, nesse caso existe a possibilidade de aumentar a velocidade da esteira em até 18m/h ocasionando erro na umidade final de no máximo 31,6%, mantendo as condições de secagem com o perfil de temperatura crescente.

A análise de redimensionamento demonstra que existe a possibilidade de diminuir o equipamento e manter a velocidade da esteira menor, porém, deve-se impor uma altura do leito de secagem maior, o que necessariamente acarretaria problemas de perda de carga do ar de secagem. Quanto ao perfil de temperatura, pelos resultados apresentados observa-se que necessariamente deve ser mantido um perfil crescente de temperatura para evitar problemas como incrustação superficial ou derretimento.

O balanço de energia demonstrou concordância próxima do equipamento real com exceção da câmara 3, nesse caso o ponto no qual existe a fase final de grande evaporação. Os resultados dos balanços demonstram ser eficiente utilizar testes laboratoriais como forma de dimensionar as necessidades energéticas. Por fim o consumo de vapor foi maior nas primeiras câmaras o que condiz com experimentos em escala de laboratório e demonstra nesta etapa inicial ser a etapa em que existe evaporação da umidade não ligada. Como sugestão para futuras pesquisas e projetos, recomenda-se a utilização de ensaios laboratoriais, balanços materiais e de energia como forma de prever o dimensionamento do equipamento futuro, determinação de condições operacionais ou mudanças no projeto do equipamento já existente.

REFERÊNCIAS

BAE, H.J., PARK, H.J., HONG, S.I., BYUN, Y.J., DARBY, D.O., ROBERT, M., KIMMEL, R.M., WHITESIDE, W.S. Effect of clay content, homogenization RPM, pH, and ultrasonication on mechanical and barrier properties of fish gelatin/ montmorillonitenano composite films. **LWT – Food Science and Technology** 42, 2009.

BARROZO, M. A. S., SARTORI, D. J. M., FREIRE, J. T. Transferência de calor e de massa em leito deslizando e escoamentos cruzados. Secagem de sementes de soja. In: FREIRE, J. T. e SILVEIRA, A. M. Tópicos especiais em sistemas particulados. São Carlos: UFSCar, cap. 4, p. 119-159, 1998.

BERTRAND, B.; NOURHE`NE, B.; CATHERINE, B.; JEAN-DOMINIQUE, D.. Modelling of moisture and salt transport in gelatine gels during drying at constant temperature, **Journal of Food Engineering**, Genes Champanelle, France, vol. 81, 657–671, 2007.

BERTOLI, A. J & NEITZEL, I - Secagem de Gelatina - Relatório Interno DEQ/UEM, 1-28,1987.

BOHNER, M.; BARFUSS, I.; HEINDL, A.; MULLER, J.. Improving the airflow distribution in a multi-belt conveyor dryer for spice plants by modifications based on computational fluid dynamics, **Biosystems Engineering**, Vestenbergsgreuth, Germany, vol. 115, 339 -345, 2013.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport, CN, USA, **The AVI Publishing Company**, 1992.

BRUIN, S. ; LUYBEN, K. Ch. M. 1980. Drying of food materials. A review of recent developments in *Advances in Drying*, Vol. 1, p. 155-216. **Hemisphere Publishing Co.**, New York.1980.

CHI-AN DAI; YI-FAN CHEN; MING-WEI LIU. Thermal Properties Measurements of Renatured Gelatin Using Conventional and Temperature Modulated Differential Scanning Calorimetry, **Journal of Applied Polymer Science**, *Taipei Taiwan*, Vol. 99, 1795–1801, 2006.

CORAZZA, F. C.; NEITZEL I.; SILVA E. A. Modelagem de secador do tipo esteira: uma aplicação industrial, **Acta Scientiarum. Technology**, Brasil, v. 25, 133-140, 2003.

DEFRAEYE, T.; BLOCKEN B.; DEROME, D.; NICOLAI, B.; CARMELIET J.: Convective heat and mass transfer modelling at air–porous material interfaces: Overview of existing methods and relevance, **Chemical Engineering Science**, Switzerland, vol. 74, 49–58, 2012.

ERBAY Z.; ICIER, F.; HEPBASLI A.; Exergetic performance assessment of a pilot-scale heat pump belt conveyor dryer. **International Journal of Energy Research**, Izmir, Turkey, 249 a 264, 2010.

FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; ALVES, J. A.; BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C.; MÓDENES, A. N.. Determinação da cinética e das isotermas de secagem do bagaço da laranja. **Acta Scientiarum Technology**, Brasil, vol. 32, 147-152, 2010.

FOUST A.S.; L. A. WENZEL; C. W. CLUMP; L. MAUS; L. B. ANDERSEN. **Princípio das Operações Unitárias. 2 ed. Brasil**: LTC, 1982.

GARCÍA-ALVARADO, M. A.; F.M. PACHECO-AGUIRRE; RUIZ-LÓPEZ, I.I. Analytical solution of simultaneous heat and mass transfer equations during food drying, **Journal of Food Engineering**, Mexico, vol 142, 39–45, 2014.

GEANKOPLIS, C. J. Mass transport phenomena. Nova York: Holt, **Rinheart and Winston Inc.**, 1972.

GEANKOPLIS, C.J. Drying of Process Materials. **Transport processes and unit operations**. 3. ed. New Jersey: Prentice–Hall, Cap. 9, p. 520-583, 1993.

GHOSHAL S.; MATTEA C.; STAPF S. Inhomogeneity in the drying process of gelatin film formation: NMR microscopy and relaxation study, **Chemical Physics Letters**, Germany, vol. 485, 343–347, 2010.

JENSEN, S.; MELEIRO L. A. C.; ZANOELO, E. F. Soft-sensor model design for control of a virtual conveyor-belt dryer of mate leaves (*Ilex paraguariensis*). **Biosystems Engineering**, Brazil, vol.108, 75-85, 2011.

LIU, X.; QIU, Z.; WANG, L.; CHENG, Y.; QU, H.; CHEN, Y.. Mathematical modeling for thin layer vacuum belt drying of *Panax notoginseng* extract, **Energy Conversion and Management**, China, vol. 50, 928–932, 2009.

KEMP, I. C.; BAHU, R. E. *A new algorithm for dryer selection*, **Drying Technology**, New York, vol. 13, 1563–1578, 1995.

KIRANOUDIS C. T.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. **Drying of solids: Selection of some continuous operation dryer types, pergamon, athens**, Greece, vol. 20, 177-188, 1996.

KIRANOUDIS C.T. Design and operational performance of conveyor-belt drying structures, **Chemical Engineering Journal** , Greece, vol. 69, 27-38, 1998.

KUSTUREE, J.; YAPA, M.; RATTANADECHO, P.; Design and analysis of the commercialized drier processing using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (case study: tea leaves), **Chemical Engineering and Processing**, Thailand, vol. 49, 389–395, 2010.

MCCABE W.L ; SMITH J. C.; HARRIOTT P.: **Unit Operation of Chemical Engineering**. 5ed. U.S.A: McGraw- Hill, 1993.

MENEZES M. L.; STRÖHER, A. P.; PEREIRA, N. C.; BARROS, A. T.D. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **Engevista**, Brasil, vol. 15, 176-186, 2013.

MOTTA LIMA O. C.; ALVES, C. E. S.; PEREIRA N. C.; MENDES, E. S. Moisture equilibrium isotherms for pinnus long-fiber cellulose. **Acta Scientiarum. Technology**, Brazil, vol. 26, 27-32, 2004.

NAKORCHEVSKII, A. I.; VYLEGZHANIN, A. N.; GASKEVICH, V. Mathematical modeling of convective heat and mass transfer in the drying of solid particles in a bed, **Journal of Engineering Physics and Thermophysics**, Vol. 67,721-726, 1994.

NEITZEL; MASSARANI. Análise do Desempenho de um Secador de Esteira, Anais do XV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, V.II, p.466-477, 1987.

NEITZEL, I - Considerações sobre a Simulação de um Secador de Gelatina Relatório Interno DEQ/UEM, 5p.,1990.

- PADOIN, N.; ADRIELI T.O. DALTOÉ; LEONARDO P. RANGEL; ROPELATO, K.; SOARES, C. Heat and mass transfer modeling for multicomponent multiphase flow with CFD, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Brazil, vol. 73, 239–249, 2014.
- PERRY, R. H., CHILTON, C. H. **Chemical Engineers' Handbook**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1973.
- PERUSSELLO, C. A; MARIANI, V. C.; AMARANTE, A. C. C. A. Numerical and experimental analysis of the heat and mass transfer during okara drying, **Applied Thermal Engineering**, Brazil, vol. 48, 325-331, 2012.
- PROMMAS R.; RATTANADECHO P.; JINDARAT W.; Energy and exergy analyses in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB). **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Thailand, 242 a 250, 2012.
- RIZZIERI, R.; MAHADEVAN, L.; VAZIRI, A.; A. Donald. Superficial Wrinkles in Stretched, Drying Gelatin Films, *Langmuir, Cambridge, vol. 22, 3622-3626, 2006.*
- RUIZ-CABRERA, M.A.; FOUCAT, L.; BONNY, J.M.; RENOU, J.P.; DAUDIN, J.D. Assessment of water diffusivity in gelatine gel from moisture profiles. I—Non-destructive measurement of 1D moisture profiles during drying from 2D nuclear magnetic resonance images, **Journal of Food Engineering**, St-Gene's-Champanelle, France, vol. 68, 209–219, 2005.
- SEBASTIAN, P.; NADEAU J. P.; PUIGGALI J. R.. Designing dryers using heat and mass Exchange networks: an application To conveyor belt dryers, **Trans Icheme**, France, vol 74, 934-943, 1996.
- SHYAMKUWAR, A. L.; CHOKASHI, K. P.; WAJE, S. S.; THORAT, B. N. Synthesis, Characterization, and Drying of Absorbable Gelatin Foam, **Drying Technology**, Mumbai, India, 28, 659–668, 2010.
- SILVA E. A.. Secagem de gelatina “análise do perfil de concentração e Temperatura no interior do gel”. [drying of gelatin “analysis and concentration profile Temperature inside the gel “].1995. 138 f. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Maringá, brasil, 1995.
- SKURATOV, S. M. ; SHKITOV, M. S. Spcific heat of water bound by high polymeric substances. **Physical Chemistry**, vol 53, 627-629, 1946.
- STRUMILLO, C., KUDRA, T. Drying: principles, applications and design. Topics inchemical engineering. Vol. 3. Switzerland: Gordon and breach science publishers, 1986.
- VELADAT R.; ASHTIANI F. Z.; RAHMANI M.. A rigorous analysis of simultaneous heat and mass transfer in the pasta drying process, Berlin, 1481 a 1488, 2013.
- WAANANEN, K. M., LICHTFIELD, J. B., & OKOS, M. R. Classification of drying models for porous solids. **Drying Technology**, 11(1), 1–40, 1993

JULIANO KATAYAMA GROFF - Possui graduação em Engenharia Química (2006 - 2012), especialização em Segurança do Trabalho (2020 - 2021), mestrado em Engenharia Mecânica (2013 - 2015), doutorado em Engenharia Química (2018 - 2021) todos pela Universidade Estadual de Maringá. Atua como docente nas áreas de Fenômenos de Transporte e Termodinâmica na Universidade Estadual de Maringá.

Redimensionamento e análise térmica
de equipamento de secagem contínua
utilizando princípios fundamentais de

TRANSFERÊNCIA DE MASSA E CALOR

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Redimensionamento e análise térmica
de equipamento de secagem contínua
utilizando princípios fundamentais de

TRANSFERÊNCIA DE MASSA E CALOR

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br