

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E
ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

Taysnara Simioni

**ESTUDO COMPARATIVO DA SECAGEM DE MICROALGAS
Scenedesmus acuminatus EM CAMADA DELGADA E LEITO DE
JORRO**

FLORIANÓPOLIS
2015

Taysnara Simioni

**ESTUDO COMPARATIVO DA SECAGEM DE MICROALGAS
Scenedesmus acuminatus EM CAMADA DELGADA E LEITO DE
JORRO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.
Orientador: Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri.

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor
Maiores informações em:
<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

Taysnara Simioni

**ESTUDO COMPARATIVO DA SECAGEM DE MICROALGAS
Scenedesmus acuminatus EM CAMADA DELGADA E LEITO DE
JORRO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Química.

Florianópolis, 11 de setembro de 2015.

Prof. Dra. Cíntia Soares
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Roberto Bianchini Derner
UFSC/CCA – Departamento de Aquicultura

Prof. Dr. João Borges Laurindo
UFSC/CTC – Departamento de Eng. Química e Eng. de Alimentos

Prof. Dr. Agenor Furigo Junior
UFSC/CTC – Departamento de Eng. Química e Eng. de Alimentos

Aos que acreditam que a persistência é
o caminho do êxito.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Marinho Bastos Quadri, pela oportunidade, confiança e por todo o ensinamento transmitido.

Aos membros da banca, pela disponibilidade, interesse e contribuições dadas a este trabalho.

Aos colegas do LASIPO, Deise, Camila, Seldis, Ianto, Fábio, Valdir, Stéphanie, Rafael, Rodrigo, Vivian, Andressa e Eduardo, pelo coleguismo, carinho, por todas as conversas e trocas de experiências e pelo interesse constante em ajudar. O convívio com cada um de vocês tornou este período imensamente mais feliz.

À Universidade Federal de Santa Catarina e, em especial, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química pela oportunidade da realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Cultivo de Algas (LCA-UFSC), por ceder a matéria-prima utilizada neste trabalho e, de forma especial, ao prof. Dr. Roberto Derner pela prestatividade.

Ao CNPQ pela bolsa de estudos.

Aos meus amigos e amigas, pela lealdade, por torcerem por mim, vibrarem com minhas conquistas e por estarem sempre presentes em todos os momentos de minha vida.

Ao Vinícius, pelo apoio, carinho, preocupação, amor e, principalmente, pela compreensão.

Ao meu querido irmão Aglian, pela parceria, carinho e amizade.

Aos meus amados pais, Ademir e Gilvane, exemplos de determinação, integridade, honestidade e humildade. Agradeço por terem me transmitido estes valores, pelo amor incondicional, por aceitarem as minhas escolhas, acreditarem nelas e me darem o suporte necessário para atingir os meus objetivos. Obrigada infinitamente por tudo!

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

RESUMO

A biomassa obtida a partir do cultivo de microalgas vem se destacando no cenário biotecnológico pela possibilidade de aplicação em uma ampla gama de processos. A secagem é uma etapa importante na produção desta biomassa, pois permite a obtenção de um produto estável e estocável para posterior processamento. Neste trabalho, foi realizado um estudo acerca do processo de secagem da microalga *Scenedesmus acuminatus* pelas técnicas de camada delgada e leito de jorro. Dois estudos foram realizados para a secagem em camada delgada em camada delgada, um envolvendo a parte experimental, e o outro, a modelagem e simulação do processo. Os parâmetros investigados por esta técnica foram: temperatura de 50 e 60°C e velocidade do ar de secagem de 1 e 2 m s⁻¹. No âmbito da secagem em leito de jorro, foi realizado o desenvolvimento da unidade experimental, bem como testes envolvendo diferentes vazões de alimentação da biomassa (0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40, 0,45, 0,50 mL min⁻¹). A biomassa seca foi avaliada por testes de teor de proteínas e lipídios e por teste qualitativo de reidratação. Os resultados demonstraram que a secagem da biomassa em camada delgada ocorreu principalmente durante o período de secagem à taxa decrescente, sendo que o processo a 60°C e 2 m s⁻¹ ocorreu no menor tempo (450 min), com os maiores valores de constante de secagem (1,48×10⁻⁴ s⁻¹) e difusividade efetiva (5,41×10⁻¹⁰ m² s⁻¹). A modelagem fenomenológica e simulação realizada reproduziu de forma adequada o comportamento obtido no estudo experimental. No secador em leito de jorro, o experimento com alimentação de 0,45 mL min⁻¹ foi considerado a melhor alternativa, visto seus elevados valores de recuperação do produto (18,49 %) e eficiência na produção de pó (86,70 %), e baixo valor de massa acumulada no leito (0,61 g). A biomassa seca em camada delgada e em leito de jorro apresentou teor de proteína de 31,2 e 27 %, respectivamente. A análise de teor de lipídios evidenciou 2,3 % para a biomassa seca em camada delgada e 7,3 % para leito de jorro. Os testes de reidratação realizados mostraram que a reidratação da biomassa seca em leito de jorro foi mais eficaz, uma vez que o aspecto pastoso foi restabelecido. Para a biomassa seca em camada delgada, grumos residuais puderam ser observados, indicando maior dificuldade na reincorporação de água pelas células.

Palavras-chave: *Scenedesmus acuminatus*. Secagem. Camada delgada. Leito de jorro.

ABSTRACT

The biomass obtained from the culture of microalgae has been highlighting in the biotech scene by its huge potential in a wide variety of applications. The drying process is an important step in the production of biomass, because it allows obtaining stable and storable product for further processing. In this work, a study about the drying process of the microalgae *Scenedesmus acuminatus* in thin layer and spouted bed was conducted. Two studies were conducted for the convective drying in thin layer, one involving the experimental part, and another, the modeling and simulation process. The investigation of the drying characteristics has been conducted in the temperature of 50 and 60°C and the airflow of 1 and 2 m s⁻¹. In the context of drying in spouted bed, it was carried out the development of the experimental unit, as well as tests involving different flow rates of biomass (0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 ml min⁻¹). The dried biomass was evaluated by content of protein and lipid and by a qualitative test of rehydration. The results showed that drying of the biomass in thin layer occurred mainly during the falling-rate period, and the process at 60° C and 2 m s⁻¹ occurred in the shortest time (450 min), with higher values of drying constant ($1.48 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) and effective diffusivity ($5.41 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). The phenomenological modeling and simulation performed reproduced properly the behavior obtained in the experimental study. The results obtained for the spouted bed dryer presented that the experiment with power flow of 0.45 mL min⁻¹ was considered the best alternative, since its high product recovery values (18.49 %) and efficiency in the production of powder (86.70 %), and low value of accumulated mass in bed (0.61 g). The biomass dried in thin layer and spouted bed showed protein content of 31.2 and 27 %, respectively. The lipid content analysis showed 2.3 % for biomass dried in thin layer and 7.3 % for spouted bed. The rehydration tests carried out showed that the rehydration of biomass dried in spouted bed was more effective, since it restored the pasty appearance. For dry biomass in thin layer, clumps could be observed after rehydration, indicating more difficult to dissolution.

Keywords: *Scenedesmus acuminatus*. Drying. Thin layer. Spouted bed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama simplificado do processo produtivo de biomassa de microalga.....	35
Figura 2 - Esquema do processo de secagem e da migração de umidade do interior para a superfície do sólido	44
Figura 3 - Curvas de secagem típica em condições constantes de secagem, conteúdo de umidade em função do tempo	46
Figura 4 - Curva de secagem típica em condições constantes de secagem, velocidade de secagem em função do conteúdo de umidade.	46
Figura 5 - Curvas de adsorção e dessorção para a <i>Spirulina</i> , na temperatura de 25°C.....	52
Figura 6 - Diagrama esquemático do leito de jorro.....	55
Figura 7 - Esquema geral da secagem de pastas utilizando partículas inertes como suporte.....	56
Figura 8 - Curva fluidodinâmica típica	59
Figura 9 - Fluxograma da metodologia envolvida neste trabalho	67
Figura 10 - Desenho esquemático do secador convectivo utilizado nos experimentos	69
Figura 11 - Pasta de microalga	70
Figura 12 - Etapas básicas para a criação de um aplicativo no COMSOL Multiphysics.....	74
Figura 13 - Elementos finitos usados em (a) uma dimensão; (b) duas dimensões e (c) três dimensões	76
Figura 14 - Diagrama da sequência de resolução de um problema no físico.....	77
Figura 15 - Domínio computacional.....	77
Figura 16 - Fluxograma do procedimento adotado para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar.....	86
Figura 17 - Diagrama esquemático da unidade experimental de leito de jorro	94
Figura 18 - Dimensões da câmara de secagem.....	95
Figura 19 - Detalhes e dimensões do ciclone tipo Lapple utilizado.....	96
Figura 20 - Curva genérica da eficiência do ciclone Lapple	103
Figura 21 - Viscosidade da pasta de microalga <i>Scenedesmus acuminatus</i> em função da taxa de deformação	106
Figura 22 - Curva de secagem da pasta de microalga <i>Scenedesmus acuminatus</i> nas condições de secagem: 50°C e 1 m s ⁻¹ , 50°C e 2 m s ⁻¹ , 60°C e 1 m s ⁻¹ e 60°C e 2 m s ⁻¹	106
Figura 23 - Curva da velocidade de secagem em função do teor de umidade da microalga <i>Scenedesmus acuminatus</i> nas condições de	

secagem: 50°C e 1 m s ⁻¹ , 50°C e 2 m s ⁻¹ , 60°C e 1 m s ⁻¹ e 60°C e 2 m s ⁻¹	107
Figura 24 - Curvas experimentais do logaritmo natural do teor de umidade livre adimensional como função do tempo de secagem nas condições de: 50°C e 1 m s ⁻¹ , 50°C e 2 m s ⁻¹ , 60°C e 1 m s ⁻¹ e 60°C e 2 m s ⁻¹	109
Figura 25 - Malha gerada para a simulação	111
Figura 26 - Modelo de isoterma de Henderson ajustado aos pontos experimentais	112
Figura 27 - Perfis de umidade (mol m ⁻³) ao longo da espessura da pasta de microalga para o tempo de secagem de 50 min, nas condições de: a) 50°C e 1 m s ⁻¹ , b) 50°C e 2 m s ⁻¹ , c) 60°C e 1 m s ⁻¹ e d) 60°C e 2 m s ⁻¹	114
Figura 28 - Perfis de umidade (mol m ⁻³) ao longo da espessura da pasta de microalga para o tempo de secagem de 100 min, nas condições de: a) 50°C e 1 m s ⁻¹ , b) 50°C e 2 m s ⁻¹ , c) 60°C e 1 m s ⁻¹ e d) 60°C e 2 m s ⁻¹	115
Figura 29 - Perfis de umidade (mol m ⁻³) ao longo da espessura da pasta de microalga para o tempo de secagem de 300 min, nas condições de: a) 50°C e 1 m s ⁻¹ , b) 50°C e 2 m s ⁻¹ , c) 60°C e 1 m s ⁻¹ e d) 60°C e 2 m s ⁻¹	116
Figura 30 - Perfis de umidade (mol m ⁻³) ao longo da espessura da pasta de microalga para o tempo final de secagem, nas condições de: a) 50°C e 1 m s ⁻¹ , b) 50°C e 2 m s ⁻¹ , c) 60°C e 1 m s ⁻¹ e d) 60°C e 2 m s ⁻¹	117
Figura 31 - Evolução da temperatura média ao longo do tempo, para os casos de secagem à temperatura de 50°C.....	118
Figura 32 - Evolução da temperatura média ao longo do tempo, para os casos de secagem à temperatura de 60°C.....	118
Figura 33 - Coeficiente convectivo de transferência de calor ao longo do tempo para os experimentos com velocidade de ar de 1 m s ⁻¹	119
Figura 34 - Coeficiente convectivo de transferência de calor ao longo do tempo para os experimentos com velocidade de ar de 2 m s ⁻¹	119
Figura 35 - Perfis de temperatura (°C) ao longo da espessura da pasta de microalga para a condição de secagem de 50°C e 1 m s ⁻¹ em diferentes tempos do processo: a) 0 min, b) 25 min, c) 50 min, d) 100 min e e) 745 min	121
Figura 36 - Perfis de temperatura (°C) ao longo da espessura da pasta de microalga para a condição de secagem de 60°C e 1 m s ⁻¹ em diferentes tempos do processo: a) 0 min, b) 25 min, c) 50 min, d) 100 min e e) 630 min	122

Figura 37 - Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo da espessura da pasta de microalga para a condição de secagem de 50°C e 2 m s^{-1} em diferentes tempos do processo: a) 0 min, b) 25 min, c) 50 min, d) 100 min e e) 700 min.....	123
Figura 38 - Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo da espessura da pasta de microalga para a condição de secagem de 60°C e 2 m s^{-1} em diferentes tempos do processo: a) 0 min, b) 25 min, c) 50 min, d) 100 min e e) 450 min.....	124
Figura 39 - Gráfico comparativo da massa de água evaporada em função do tempo para os estudos experimental e simulado, caso de 50°C e 1 m s^{-1}	126
Figura 40 - Gráfico comparativo da massa de água evaporada em função do tempo para os estudos experimental e simulado, caso de 50°C e 2 m s^{-1}	126
Figura 41 - Gráfico comparativo da massa de água evaporada em função do tempo para os estudos experimental e simulado, caso de 60°C e 1 m s^{-1}	127
Figura 42 - Gráfico comparativo da massa de água evaporada em função do tempo para os estudos experimental e simulado, caso de 60°C e 2 m s^{-1}	127
Figura 43 - Queda de pressão no leito de jorro sem as partículas inertes em função da velocidade do ar na entrada do leito.....	129
Figura 44 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar na entrada do leito para a temperatura de 60°C	130
Figura 45 - Acompanhamento da massa de pó produzido ao longo do tempo, para todas as vazões estudadas	131
Figura 46 - Velocidade de produção de pó em função do tempo	132
Figura 47 - Teste de reidratação para a microalga seca por secagem em camada delgada: a) 50°C e 1 m s^{-1} , b) 50°C e 2 m s^{-1} , c) 60°C e 1 m s^{-1} e d) 60°C e 2 m s^{-1}	139
Figura 48 - Teste de reidratação para a microalga seca por secagem em leito de jorro: a) $0,20\text{ mL min}^{-1}$, b) $0,25\text{ mL min}^{-1}$, c) $0,30\text{ mL min}^{-1}$, d) $0,35\text{ mL min}^{-1}$, e) $0,40\text{ mL min}^{-1}$, f) $0,45\text{ mL min}^{-1}$ e g) $0,50\text{ mL min}^{-1}$	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Panorama da produção de microalgas	30
Tabela 2 - Análise bioquímica da biomassa seca obtida a partir do cultivo de diferentes espécies de microalga	31
Tabela 3 - Parâmetros empregados nos experimentos de secagem em camada delgada	70
Tabela 4 - Condições do ar ambiente	87
Tabela 5 - Teor de umidade de equilíbrio de microalga em função do coeficiente de atividade da água.....	87
Tabela 6 - Parâmetros e coeficiente convectivo	89
Tabela 7 - Expressões para a determinação da massa específica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura.....	90
Tabela 8 - Expressões para a determinação da capacidade calorífica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura.....	91
Tabela 9 - Expressões para a determinação da condutividade térmica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura.....	91
Tabela 10 - Constituição da microalga considerada nas simulações	92
Tabela 11 - Propriedades da microalga considerada nas simulações	92
Tabela 12 - Dados do ar seco e da água utilizados no cálculo das propriedades do fluido suporte	93
Tabela 13 - Parâmetros empregados em cada simulação	93
Tabela 14 - Parâmetros empregados nos experimentos de secagem em leito de jorro	100
Tabela 15 - Caracterização da microalga <i>Scenedesmus acuminatus</i> ...	105
Tabela 16 - Tempo e percentual de água evaporada no período de secagem a taxa constante.....	108
Tabela 17 - Tempo de secagem, umidade final do produto, constante de secagem e difusividade efetiva da microalga <i>Scenedesmus acuminatus</i> para os casos estudados	110
Tabela 18 - Produtividade dos experimentos de secagem da biomassa em camada delgada	111
Tabela 19 - Constantes dos modelos de isoterma ajustados	112
Tabela 20 - Concentração inicial de água na microalga, para todos os casos estudados	113
Tabela 21 - Coeficiente de determinação para os casos avaliados na secagem em camada delgada.....	128
Tabela 22 - Propriedades das partículas de EVA	128
Tabela 23 - Dados obtidos no teste em branco.....	130
Tabela 24 - Resumo dos principais resultados obtidos nos experimentos de secagem em leito de jorro da microalga <i>Scenedesmus acuminatus</i>	133

Tabela 25 - Indicadores do desempenho dos experimentos de secagem em leito de jorro	133
Tabela 26 - Variáveis utilizadas no cálculo do diâmetro de corte do ciclone	134
Tabela 27 - Determinação do diâmetro médio do pó produzido	135
Tabela 28 - Teor de lipídios e proteína para o produto da secagem em camada delgada e em leito de jorro.....	136

LISTA DE SÍMBOLOS

q_{cd}	Taxa de transferência de calor condutivo	W
A	Área normal à direção do fluxo de calor	m ²
κ	Condutividade térmica	W m ⁻¹ K ⁻¹
T	Temperatura	K
q_{cv}	Taxa de transferência de calor convectivo	W
h	Coefficiente de transferência de calor convectivo	W m ⁻² K ⁻¹
J_i	Fluxo difusivo molar da espécie i	mol s ⁻¹ m ⁻²
D_{ef}	Coefficiente de difusão de massa ou difusividade efetiva de massa	m ² s ⁻¹
C_i	Concentração do componente i	mol m ⁻³
N_i	Fluxo molar de transferência de massa da espécie i	mol s ⁻¹ m ⁻²
k_c	Coefficiente convectivo de transferência de massa	m s ⁻¹
c_{is}	Concentração da espécie i na interface sólido-meio de secagem	mol m ⁻³
$c_{i\infty}$	Concentração da espécie i no meio de secagem	mol m ⁻³
UR	Umidade relativa	%
P	Pressão parcial do vapor d'água	Pa
P_{sat}	Pressão de vapor d'água na saturação	Pa
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco	K
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido	K
X_{bs}	Umidade em base seca	kg de água kg de material seco ⁻¹
X_{bu}	Umidade em base úmida	kg de água kg de material úmido ⁻¹
m_A	Massa de água no material	kg
m_{ms}	Massa de material seco	kg
m_{mu}	Massa de material úmido	kg
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	kg de água kg de material seco ⁻¹
a_w	Atividade de água	(-)
P_0	Pressão de vapor d'água pura	Pa
H_{max}	Altura máxima de jorro estável	m

v_{mj}	Velocidade mínima de jorro	$m s^{-1}$
ΔP	Queda de pressão no leito estável	Pa
ΔP_{max}	Queda de pressão máxima no leito	Pa
v_{mf}	Velocidade mínima de fluidização	$m s^{-1}$
v_{ji}	Velocidade de jorro incipiente	$m s^{-1}$
v_{ij}	Velocidade de início de jorro	$m s^{-1}$
v_{max}	Valor máximo da velocidade mínima de jorro	$m s^{-1}$
D_c	Diâmetro da coluna de secagem	m
D_i	Diâmetro do orifício de entrada do ar na coluna de secagem	m
$\rho_{ap,pm}$	Massa específica aparente da pasta de microalga	$kg m^{-3}$
X_0	Umidade inicial da pasta de microalga	$kg \text{ água } kg \text{ de } microalga \text{ seca}^{-1}$
μ_{pm}	Viscosidade aparente da pasta de microalga	cP
m_{pms}	Massa de pasta de microalga seca	kg
V	Volume	m^3
DR	Velocidade de secagem	$kg \text{ de } \text{água } kg \text{ de } material \text{ seco}^{-1} min^{-1}$
X_t	Umidade do tempo t	$kg \text{ de } \text{água } kg \text{ de } material \text{ seco}^{-1}$
X_{t-dt}	Umidade do tempo t-dt	$kg \text{ de } \text{água } kg \text{ de } material \text{ seco}^{-1}$
X_{t+dt}	Umidade do tempo t+dt	$kg \text{ de } \text{água } kg \text{ de } material \text{ seco}^{-1}$
R^2	Coefficiente de determinação	(-)
n	Número de observações	(-)
\hat{y}_i	Massa de água na simulação	kg
\bar{y}	Média dos valores de massa de água observados experimentalmente	kg
y_i	Massa de água no experimento	kg
X	Teor de umidade	$kg \text{ de } \text{água } kg \text{ de } material \text{ seco}^{-1}$
t	Tempo	s
X'	Razão adimensional de umidade	(-)
L	Espessura da amostra	m
n_t	Número inteiro positivo	(-)

K	Constante de secagem	$m^2 s^{-1}$
r	Raio considerado no domínio	m
z	Espessura considerada no domínio	m
ρ	Massa específica	$kg m^{-3}$
C_P	Capacidade calorífica	$J kg^{-1} K^{-1}$
ρ_{fs}	Massa específica do fluido suporte	$kg m^{-3}$
$C_{P,fs}$	Capacidade calorífica do fluido suporte	$J kg^{-1} K^{-1}$
u	Campo de velocidade	$m s^{-1}$
κ_{ef}	Condutividade térmica efetiva	$W m^{-1} K^{-1}$
Q	Fonte de calor	$J kg^{-1}$
θ	Fração de volume da fase fluida	(-)
ρ_p	Massa específica do meio poroso	$kg m^{-3}$
$C_{P,p}$	Capacidade calorífica do meio poroso	$J kg^{-1} K^{-1}$
κ_p	Condutividade térmica do meio poroso	$W m^{-1} K^{-1}$
κ_{fs}	Condutividade térmica do fluido suporte	$W m^{-1} K^{-1}$
κ_A	Condutividade térmica da água	$W m^{-1} K^{-1}$
κ_{ar}	Condutividade térmica do ar	$W m^{-1} K^{-1}$
$c_{A,0}$	Concentração inicial de água na pasta de microalga	$mol m^{-3}$
c_A	Concentração da água no fluido suporte	$mol m^{-3}$
ρ_A	Massa específica da água	$kg m^{-3}$
ρ_{ar}	Massa específica do ar	$kg m^{-3}$
$C_{P,A}$	Capacidade calorífica da água	$J kg^{-1} K^{-1}$
$C_{P,ar}$	Capacidade calorífica do ar	$J kg^{-1} K^{-1}$
T_{amb}	Temperatura ambiente	K
n	Normal à fronteira apontando para fora do domínio	(-)
T_{ar}	Temperatura do ar	K
T_{pm}	Temperatura da pasta de microalga	K
Q_b	Fluxo convectivo de calor	$J m^{-2} s^{-1}$
M_A	Massa molar da água	$kg mol^{-1}$
Q_{st}	Calor isostérico integral	$J kg^{-1}$
$c_{A\infty}$	Concentração de água no ar de secagem	$mol m^{-3}$
c_{As}	Concentração de água na camada de ar em contato com a superfície do domínio	$mol m^{-3}$
ΔH_{vap}	Calor de vaporização da água pura	$J kg^{-1}$
$c_{P,A}$	Quantidade de água adsorvida na pasta de microalga	mol de água kg de microalga kg^{-1} seca ¹
a_v	Fração de volume da fase gasosa	(-)
$c_{G,A}$	Concentração de vapor d'água na fase gasosa	mol de água m^{-3} de ar seco

D_D	Tensor de dispersão	$m^2 s^{-1}$
R_A	Taxa de reação	$mol m^{-3} s^{-1}$
S_A	Termo de fonte	$mol m^{-3} s^{-1}$
N_A	Fluxo molar de água evaporada da pasta de microalga	$mol m^{-2} s^{-1}$
R	Constante universal dos gases ideais	$Pa m^3 mol^{-1} K^{-1}$
$P_{sat,ar}$	Pressão de vapor saturado do ar	Pa
$P_{sat,va}$	Pressão de saturação do vapor de água	Pa
UA_{amb}	Umidade absoluta do ar ambiente	kg de H_2O kg de ar $seco^{-1}$
P_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
m	Constante de Henderson	(-)
n	Constante de Henderson	(-)
A_S	Área superficial	m^2
x_i	Fração mássica dos componentes	(-)
ρ_i	Massa específica dos componentes	$kg m^{-3}$
C_{pi}	Capacidade calorífica dos componentes	$J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$
κ_i	Condutividade térmica dos componentes	$W m^{-1} ^\circ C^{-1}$
ϵ_{pm}	Porosidade da pasta de microalga	(-)
H_c	Altura da coluna de secagem	m
D_{cic}	Diâmetro do ciclone	m
D_e	Diâmetro do tubo de saída do ar no ciclone (vórtex)	m
S	Comprimento do cilindro de saída de ar no ciclone	m
$H_{cil,cic}$	Altura da parte cilíndrica do ciclone	m
$H_{t,cic}$	Altura total do ciclone	m
a	Altura de entrada do ciclone	m
b	Largura de entrada do ciclone	m
B	Diâmetro da saída de pó no ciclone	m
$d_{p,EVA}$	Diâmetro médio de partícula de EVA	mm
$\rho_{p,EVA}$	Massa específica da partícula de EVA	$kg m^{-3}$
$\rho_{ap,EVA}$	Massa específica aparente do EVA	$kg m^{-3}$
ϵ_{EVA}	Porosidade do leito de EVA	(-)
m_{EVA}	Massa de partículas de EVA	kg
V_{pic}	Volume do picnômetro	m^3
V_{leito}	Volume do leito de EVA	m^3
V_A	Volume de água	m^3
Q_1	Vazão volumétrica do ar no estado 1	$m^3 s^{-1}$
P_1	Pressão do ar no estado 1	atm
T_1	Temperatura do ar no estado 1	K

Q_2	Vazão volumétrica do ar no estado 2	$m^3 s^{-1}$
P_2	Pressão do ar no estado 2	atm
T_2	Temperatura do ar no estado 2	K
Q_{ar}	Vazão volumétrica de ar	$m^3 s^{-1}$
v_{ar}	Velocidade do ar na entrada do leito	$m s^{-1}$
A_{ar}	Área do bocal de entrada do ar no leito	m^2
$v_{pó}$	Velocidade de produção de pó	g de pó min^{-1}
$P_{pó,t}$	Produção de pó no tempo t	g de pó produzido
$P_{pó,t-dt}$	Produção de pó no tempo t-dt	g de pó produzido
$P_{pó,t+dt}$	Produção de pó no tempo t+dt	g de pó produzido
R_p	Percentual de recuperação do produto	%
m_{ac}	Massa acumulada na câmara de secagem	g
$\eta_{pó}$	Eficiência na produção de pó	%
$m_{pó,p}$	Massa de pó produzido	g
$X_{bu,pó}$	Umidade do pó coletado no ciclone, em base úmida	g de água g de pó ⁻¹
m_i	Massa de pasta de microalga introduzida no secador	g
$X_{bu,i}$	Umidade da pasta de microalga introduzida no secador, em base úmida	g de água g de pasta de microalga ⁻¹
$X_{bu,ac}$	Umidade da massa acumulada no leito, em base úmida	g de água g de material acumulado no leito ⁻¹
d_{pc}	Diâmetro de corte do ciclone	m
μ_{ar}	Viscosidade do ar	$kg s m^{-2}$
Ne	Número de voltas	(-)
v_{ar}	Velocidade de alimentação do ar	$m s^{-1}$
$\rho_{pó}$	Massa específica do pó	$kg m^{-3}$
$d_{pó}$	Diâmetro médio das partículas de pó	m

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS.....	26
1.1.1	Objetivo geral.....	26
1.1.2	Objetivos Específicos.....	26
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	MICROALGAS.....	29
2.1.1	Composição bioquímica.....	30
2.1.2	Vantagens do uso.....	32
2.1.3	Aplicações.....	33
2.1.4	Tecnologias para a produção de biomassa de microalgas.....	35
2.1.5	Tecnologias de Recuperação da Biomassa.....	36
2.1.6	Processos de Desidratação e Secagem.....	37
2.2	SECAGEM.....	38
2.2.1	Fenomenologia envolvida na secagem.....	39
2.2.1.1	Transferência de calor.....	39
2.2.1.1.1	Condução.....	39
2.2.1.1.2	Convecção.....	40
2.2.1.2	Transferência de massa.....	41
2.2.1.2.1	Difusão.....	42
2.2.1.2.2	Convecção.....	43
2.2.2	Aspectos gerais da secagem.....	43
2.2.2.1	Cinética de secagem.....	45
2.2.2.2	A divisão da secagem em períodos.....	45
2.2.2.3	Mecanismos de secagem.....	47
2.2.2.3.1	Período de secagem a taxa constante.....	47
2.2.2.3.2	Período à taxa decrescente.....	48
2.2.2.4	Condições externas – meio de secagem.....	49
2.2.2.4.1	Umidade do ar.....	49
2.2.2.4.2	Temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido.....	49
2.2.2.5	Condições internas.....	50
2.2.2.5.1	Teor de umidade do sólido.....	50
2.2.2.5.2	Isotermas de equilíbrio.....	51
2.2.3	Secagem convectiva.....	53
2.2.4	Secagem em leito de jorro.....	54
2.2.4.1	Aspectos gerais sobre o leito de jorro.....	54
2.2.4.2	Descrição e análise do processo de secagem de pasta.....	55

2.2.4.3	Estado da arte	56
2.2.4.4	Fluidodinâmica do leito de jorro	58
2.2.4.4.1	<i>Velocidade mínima de jorro</i>	59
2.2.4.4.2	<i>Altura máxima de jorro estável</i>	60
2.2.4.4.3	<i>Queda de pressão</i>	60
2.2.4.5	Requisitos para o jorro	61
2.2.5	Secagem de microalgas - estado da arte	61
2.3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	63
3	MATERIAL E MÉTODOS	67
3.1	BIOMASSA DE MICROALGA.....	67
3.1.1	Caracterização da biomassa de microalga	68
3.2	SECAGEM EM CAMADA DELGADA.....	68
3.2.1	Estudo experimental	69
3.2.1.1	Equipamento de secagem	69
3.2.1.2	Procedimento experimental.....	70
3.2.1.3	Análise dos dados.....	71
3.2.1.4	Estimativa da difusividade efetiva	72
3.2.2	Estudo computacional	73
3.2.2.1	O COMSOL Multiphysics	74
3.2.2.2	Método dos elementos finitos	75
3.2.2.3	Desenvolvimento do modelo.....	77
3.2.2.4	Modelagem fenomenológica	77
3.2.2.4.1	<i>Transferência de calor em meio poroso</i>	78
3.2.2.4.2	<i>Transferência de massa em meio poroso</i>	82
3.2.2.5	Parâmetros do modelo.....	85
3.2.2.5.1	<i>Equações psicrométricas</i>	85
3.2.2.6	Propriedades dos materiais.....	86
3.2.2.6.1	<i>Condições do ar</i>	86
3.2.2.6.2	<i>Determinação do equilíbrio higroscópico entre a pasta de microalga e o ar de secagem</i>	87
3.2.2.6.3	<i>Coefficiente convectivo de transferência de massa</i>	88
3.2.2.6.4	<i>Propriedades termo-físicas da microalga e do fluido suporte</i>	89
3.2.3	Detalhes da simulação	93
3.3	SECAGEM EM LEITO DE JORRO	94
3.3.1	Descrição da unidade experimental	94
3.3.2	Descrição e caracterização dos materiais utilizados	96
3.3.2.1	Partículas inertes	96
3.3.3	Metodologia experimental	98
3.3.3.1	Caracterização da unidade experimental	98

3.3.3.2	Procedimento experimental de secagem.....	99
3.3.3.3	Desempenho do processo de secagem.....	101
3.3.3.4	Propriedades do pó produzido	102
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA SECA	103
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
4.1	BIOMASSA DE MICROALGA	105
4.2	SECAGEM EM CAMADA DELGADA	106
4.2.1	Estudo experimental.....	106
4.2.2	Estudo computacional	111
4.2.2.1	Malha gerada	111
4.2.2.2	Isoterma de equilíbrio higroscópico	112
4.2.2.3	Perfil de umidade.....	112
4.2.2.4	Perfil de temperatura	118
4.2.3	Comparação entre os estudos experimental e computacional.....	125
4.3	SECAGEM EM LEITO DE JORRO	128
4.3.1	Caracterização dos materiais utilizados	128
4.3.1.1	Partículas inertes.....	128
4.3.2	Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro	129
4.3.3	Análise do processo de secagem em leito de jorro	131
4.3.4	Cálculo do diâmetro de partícula.....	134
4.4	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA SECA	136
4.4.1	Análise do teor de proteínas e lipídeos.....	136
4.4.2	Teste de reidratação	137
5	CONCLUSÃO	141
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	145
	REFERÊNCIAS.....	147

1 INTRODUÇÃO

O crescente interesse na pesquisa e aplicação de microalgas em diversos setores, juntamente com a importância do processo de secagem da biomassa visando sua conservação e estabilidade, tem motivado autores ao redor do mundo a estudarem este assunto.

Um dos grandes desafios tecnológicos deste século é encontrar fontes de energia renováveis e menos poluentes. A biomassa obtida a partir de microalgas pode ser uma importante alternativa e estudos têm sido realizados na busca por soluções que viabilizem o seu uso como matéria-prima para a obtenção de combustíveis (AZIZ; ODA; KASHIWAGI, 2014; MASSART et al., 2014).

O crescente interesse nesta biomassa não está atrelado apenas à expectativa de ter seu uso como fonte de energia. Indústria química, farmacêutica, de cosméticos, nutrição animal e suplementos alimentares estão, atualmente, entre os principais setores que já utilizam a biomassa produzida a partir das microalgas em seus produtos (DERNER et al., 2006; MASSART et al., 2014; MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; XU et al., 2011).

A secagem é uma etapa importante do processo, pois viabiliza a obtenção de um produto estável e estocável para posterior processamento (BRENNAN; OWENDE, 2010; LIRA et al., 2012; SHOW; LEE; CHANG, 2013). A remoção da umidade impede o crescimento e reprodução de micro-organismos que causam o apodrecimento e minimiza muitas reações deteriorativas. Assim, o processo de secagem possibilita longos períodos de armazenamento do material e redução de peso e volume, o que significa a redução dos custos de embalagem, armazenamento e transporte (GEANKOPLIS, 1993; LUIZ, 2012; MALAFRONTTE et al., 2012).

No entanto, a secagem é um processo de intenso gasto energético e está entre os maiores impecilhos para a utilização de microalgas (AZIZ; ODA; KASHIWAGI, 2014; BAGCHI; RAO; MALLICK, 2015). Estima-se que a secagem da biomassa de microalgas possa representar até 30 % dos custos totais de produção (BAGCHI; RAO; MALLICK, 2015).

Desta forma, o processo de secagem da biomassa de microalga exige uma resposta inovadora, que alie economia de energia e qualidade da biomassa seca obtida. Com este pensamento, surge a motivação desta dissertação, que envolve o estudo e a avaliação da secagem da biomassa de microalga por duas técnicas: a secagem em camada delgada e a secagem em leito de jorro.

A secagem em camada delgada está entre as técnicas mais tradicionais e é comumente utilizada para a secagem de alimentos e materiais biológicos, devido principalmente à sua simplicidade (BABALIS; BELESSIOTIS, 2004; DOYMAZ, 2009). Já a secagem em leito de jorro, é uma técnica menos difundida, mas que tem sido bastante indicada para a secagem de pastas (MEDEIROS et al., 2001; NASCIMENTO, 2013).

No presente estudo, uma abordagem do processo de secagem da microalga *Scenedesmus acuminatus* pelas técnicas de camada delgada e leito de jorro foi realizada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar comparativamente o processo de secagem da microalga *Scenedesmus acuminatus* pelas técnicas de camada delgada e leito de jorro.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar a secagem em camada delgada da microalga *Scenedesmus acuminatus* através de curvas características experimentais e determinar a influência das condições testadas no processo de secagem;

- Determinar a difusividade efetiva da umidade durante a secagem de microalgas *Scenedesmus acuminatus* a partir de curvas características experimentais do processo em camada delgada para diferentes condições operacionais;

- Modelar a secagem em camada delgada considerando os fenômenos de transferência de calor e massa de modo a representar os resultados experimentais;

- Determinar a evolução dos perfis simulados de umidade e temperatura na camada submetida à secagem;

- Desenvolver um secador de bancada do tipo leito de jorro e realizar a sua caracterização fluidodinâmica;
- Caracterizar a secagem em leito de jorro das microalgas *Scenedesmus acuminatus* através de curvas de produção de pó em função do tempo;
- Determinar a influência da vazão de alimentação das microalgas *Scenedesmus acuminatus* na produção de biomassa seca e no desempenho do secador leito de jorro;
- Estimar o diâmetro médio do pó seco retido pelo ciclone;
- Comparar a secagem em camada delgada e em leito de jorro com relação à reidratação, teor de proteína e lipídios da biomassa seca.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em seis capítulos, dos quais o primeiro traz uma breve introdução do tema, contextualizado o assunto abordado, juntamente com os objetivos deste estudo.

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica dos temas abordados na dissertação, que incluem aspectos relevantes acerca das microalgas e princípios de secagem, com destaque para os métodos de secagem convectiva em camada delgada e secagem em leito de jorro.

O capítulo 3 contempla a metodologia utilizada para o estudo. Este capítulo subdivide-se na apresentação e caracterização da microalga utilizada, seguida pela apresentação dos métodos utilizados para a secagem pelas duas técnicas. Ao final do capítulo, é apresentada a metodologia para a caracterização da biomassa seca.

Os resultados obtidos e as discussões referentes a eles estão no capítulo 4. No capítulo 5, as conclusões do estudo realizado são apresentadas. No capítulo 6, sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão apresentados os principais aspectos teóricos relevantes ao estudo da secagem de microalgas. A revisão bibliográfica desta dissertação inclui características gerais das microalgas, sua utilização e sistemas de cultivo, seguida pela teoria de secagem em camada delgada e em leito de jorro. Por fim, um estado da arte é apresentado, englobando os principais estudos na área.

2.1 MICROALGAS

As microalgas são micro-organismos procariontes ou eucariontes, que produzem carboidratos, proteínas e lipídios, como resultados da fotossíntese. Com estrutura simples, estes micro-organismos podem crescer rapidamente e viver em condições adversas, requerendo luz solar, água, dióxido de carbono (CO₂), nitrogênio e fósforo. A adição de nutrientes específicos e condições ambientais adequadas podem acelerar a velocidade de crescimento das microalgas (AZEREDO, 2012; MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; MOSTAFA, 2012). Estima-se que existam mais de 50 mil espécies de microalgas, mas apenas cerca de 30 mil foram estudadas e analisadas até o momento (RICHMOND, 2004).

A primeira espécie de microalga a ser produzida comercialmente foi a *Chlorella sp.*, no início dos anos 1960, no Japão. Essa produção está relacionada aos avanços nas pesquisas obtidas na década anterior, nos Estados Unidos, Japão, Alemanha e Israel. Tendo como objetivo principal fornecer alimento com alto valor nutritivo, o cultivo da *Chlorella* foi, pioneiramente, feito em lagoas circulares com injeção de ar rico em CO₂. Nos anos seguintes, a produção de microalgas expandiu-se em países como EUA, Índia, Israel e Austrália (AZEREDO, 2012; BRENNAN; OWENDE, 2010; MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

Nos últimos 50 anos têm sido observados uma extensa pesquisa no ramo de microalga e como estes micro-organismos podem ser utilizados em uma larga variedade de processos ou como matéria-prima para a produção de vários produtos economicamente importantes e práticos (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). Na Tabela 1 é apresentado um panorama a respeito da produção atual de microalgas.

Tabela 1 - Panorama da produção de microalgas

Microalga	Produção anual*	Aplicação e produto	Preço (€)
<i>Spirulina</i>	3.000 ton (m.s.)	Nutrição humana Nutrição animal Cosméticos Ficobiliproteínas	36 kg ⁻¹ 11 mg ⁻¹
<i>Chlorella</i>	2.000 ton (m.s.)	Nutrição humana Cosméticos Aquacultura	36 kg ⁻¹ 50 L ⁻¹
<i>Dunaliella salina</i>	1.200 ton (m.s.)	Nutrição humana Cosméticos B-caroteno	215-2150 kg ⁻¹
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	500 ton (m.s.)	Nutrição humana	
<i>Haematococcus pluvialis</i>	300 ton (m.s.)	Aquacultura Astaxantina	50 L ⁻¹ 7150 kg ⁻¹
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	240 ton (óleo DHA)	Óleo DHA	43 g ⁻¹
<i>Schizochytrium</i>	10 ton (óleo DHA)	Óleo DHA	43 g ⁻¹

*m.s. – massa seca; óleo DHA – ácido docosaheptaenóico

Fonte: adaptado de Brennan e Owende (2010)

2.1.1 Composição bioquímica

A composição bioquímica das microalgas é um fator importante, pois está diretamente atrelada à sua aplicação (BILLER; ROSS, 2014). Basicamente, as microalgas são compostas por carboidratos, proteínas e lipídios, e a proporção de cada componente depende não apenas da espécie da microalga, como também de fatores relacionados às condições do cultivo, incluindo composição do meio, aeração, intensidade luminosa e temperatura (LIU et al., 2015; SPOLAORE et al., 2006; DUNSTAN et al., 1993 apud TONON et al., 2002; VOLTOLINA; SÁNCHEZ-SAAVEDRA; TORRES-RODRÍGUEZ, 2008).

Na literatura podem-se encontrar alguns trabalhos onde a composição bioquímica de diferentes espécies de microalga foi determinada (BILLER; ROSS, 2014; CAMPOS; BARBARINO; LOURENÇO, 2010; CRUZ, 2011). Na Tabela 2 estão apresentados os

resultados obtidos por Biller e Ross (2014), que determinaram o conteúdo de proteínas, carboidratos e lipídios em diversas espécies de microalgas via "Analytical Pyrolysis Gas Chromatography Mass Spectrometry" (py-GC-MS). Segundo os autores, esta técnica não considera a fração inorgânica nas amostras de microalgas.

Tabela 2 - Análise bioquímica da biomassa seca obtida a partir do cultivo de diferentes espécies de microalga

(continua)

Microalga	Condições de cultivo	Proteínas (%)	Carboidratos (%)	Lipídios (%)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Raceway, dia 8, batelada 1	48,8	25	22,5
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Raceway, dia 8, batelada 2	45,6	19,2	19,5
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Raceway, dia 22, batelada 1	44,4	26,5	20,1
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Raceway, dia 22, batelada 2	42,9	25,3	21,8
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Raceway, meio padrão	17	46,1	19,2
<i>Pseudochoricystis ellipsoidea</i>	Baixa concentração de N ₂	20	35,6	34,3
<i>Pseudochoricystis ellipsoidea</i>	Alta concentração de N ₂	51,8	25,7	25,7
<i>Pseudochoricystis ellipsoidea</i>	Fotobiorreator meio não conhecido	10,2	34,1	38,1
<i>Pseudochoricystis ellipsoidea</i>	Raceway externo, centrifugado	27,5	19,3	45,4
<i>Pseudochoricystis ellipsoidea</i>	Raceway externo, floculação química	24,9	22,2	36,7
<i>Chlorogloeopsis fritschii</i>	Fotobiorreator, meio não conhecido	41,8	37,8	8,2
<i>Chlorella vulgaris</i>	Heterotrófico, glucose	33,9	45,8	4,2
<i>Chlorella vulgaris</i>	Heterotrófico, sucrose	36,7	50,1	5,6

Tabela 2 - Análise bioquímica de diferentes espécies de microalga seca
(conclusão)

Microalga	Condições de cultivo	Proteínas (%)	Carboidratos (%)	Lipídios (%)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Heterotrófico, melação	41,6	35,9	7,2
<i>Chlorella vulgaris</i>	Heterotrófico, glicerol	17,6	60,4	23,2
<i>Chlorella vulgaris</i>	Fotoautotrófico meio não conhecido	53,1	23,6	15,3
<i>Chlorella FC2 IITG</i>	Meio não conhecido	10,4	24,5	37,3
<i>Chlorella vulgaris minutissima</i>	Meio não conhecido	10,3	13,9	56,7
<i>Chlorella emersonii</i>	Meio não conhecido	9,03	37,9	29,3
<i>Chlorella zofingiensis</i>	Meio não conhecido	11,2	11,5	56,7
<i>Spirulina sp.</i>	Meio não conhecido	50,1	15,1	12,3

Fonte: Biller e Ross (2014)

2.1.2 Vantagens do uso

A produção e o uso da biomassa derivada de microalgas apresenta uma série de vantagens:

- i) a produção de microalgas pode ocorrer durante todo o ano, dependendo das condições climáticas locais. Assim, a produtividade de lipídios de culturas de microalgas pode superar o rendimento das melhores culturas oleaginosas;
- ii) embora cresçam em meio aquoso, as microalgas precisam de menos água que as culturas terrestres;
- iii) microalgas podem ser cultivadas em água salobra e em solos não cultiváveis, minimizando impactos ambientais associados e não comprometendo a produção de outras culturas;
- vi) microalgas têm um potencial de crescimento rápido e muitas espécies possuem conteúdo de óleo entre 20 e 50 % em massa seca de biomassa, valor este que pode ser aumentado por meio de condições otimizadas, como o controle do nível de nitrogênio, intensidade luminosa, temperatura, salinidade, concentração de CO₂ e procedimento de colheita;

- v) a produção de biomassa de microalgas pode efetuar a biofixação de carbono, convertendo-o em moléculas orgânicas (carboidratos, proteínas e lipídios) através da fotossíntese;
- vi) os nutrientes necessários para o cultivo de microalgas (especialmente nitrogênio e fósforo) podem ser obtidos a partir de águas residuais, o que, além de proporcionar o meio de crescimento, tem ainda potencial para o tratamento de efluentes orgânicos provenientes da indústria agroalimentar;
- vii) as microalgas produzem ainda valiosos produtos secundários, tais como proteínas e biomassa residual do processo de extração de óleo, que pode ser utilizado na nutrição animal, como fertilizantes orgânicos e ainda, fermentado para produção de etanol ou metano;
- viii) a composição bioquímica da biomassa proveniente de microalgas pode ser modulada de acordo com variações nas condições de crescimento (BRENNAN; OWENDE, 2010; RASHID et al., 2014; RAWAT et al., 2013).

2.1.3 Aplicações

A biomassa produzida a partir de microalgas tem um enorme potencial em uma ampla variedade de aplicações.

Como primeiro exemplo, pode-se citar a aplicação na nutrição humana, onde as microalgas vêm sendo utilizadas em diferentes formas (comprimidos, cápsulas e líquidos, além de serem incorporadas em massas, salgadinhos, doces, gomas de mascar e bebidas). As microalgas destacam-se neste ramo por conter compostos antioxidantes com capacidade de prevenir contra uma série de doenças e contra o estresse oxidativo. Além disso, apresentam um valor nutritivo elevado, devido ao seu alto conteúdo de proteína (MOSTAFA, 2012). Segundo Mata, Martins e Caetano (2010), os benefícios que as microalgas oferecem para a saúde humana estão sendo mais investigados e reconhecidos nas últimas três ou quatro décadas, especialmente desde a introdução de suplementos probióticos. Os autores afirmam ainda que estes microorganismos são vistos como uma proteína de qualidade superior a outras fontes vegetais, tais como trigo, arroz e leguminosas.

No tocante à utilização ambiental, microalgas podem desempenhar um importante papel na biorremediação de águas residuais e sequestro de dióxido de carbono (BARROS et al., 2015). Águas residuais apresentam nutrientes essenciais para o crescimento de microalgas, o que permite incorporá-las no tratamento desta água. O

crescimento de microalgas combinado com a limpeza biológica de águas residuais é um ramo bastante promissor (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; MOSTAFA, 2012; SUALI; SARBATLY, 2012). De acordo com Suali e Sarbatly (2012), as microalgas são ainda capazes de reduzir a demanda química de oxigênio (DQO) bem como a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em águas residuais.

Compostos químicos tais como pigmentos, antioxidantes, β -caroteno, polissacarídeos, triglicerídeos e vitaminas, podem ser extraídos da biomassa produzida a partir de microalgas. Estes compostos são largamente utilizados como matéria-prima em diferentes setores industriais, como por exemplo, na indústria farmacêutica, de cosméticos, de alimentos e de biocombustíveis (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; SUALI; SARBATLY, 2012).

Na literatura são relatadas algumas espécies de microalgas, dentre elas, *Chlorella*, *Scenedesmus* e *Spirulina*, como adequadas para a preparação de alimentos para animais. A inclusão destas microalgas na ração de peixes e outros animais têm aspectos benéficos: melhoria da fertilidade, melhor controle de peso, pele mais saudável, entre outros (MOSTAFA, 2012; SUALI; SARBATLY, 2012).

O uso de microalgas como biofertilizantes é também uma alternativa promissora, pois evita a poluição do solo causada por agrotóxicos. Além disso, as microalgas são capazes de recuperar o conteúdo de nutrientes do solo e desempenham um papel importante em várias transformações químicas de solos, disponibilizando nutrientes importantes como nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre para as plantas (MOSTAFA, 2012).

Além das aplicações acima relatadas, esses micro-organismos fotossintéticos têm sido considerados uma potencial fonte de combustíveis renováveis, uma vez que podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de biodiesel, biometano, bioetanol, biohidrogênio e biobutanol (BARROS et al., 2015).

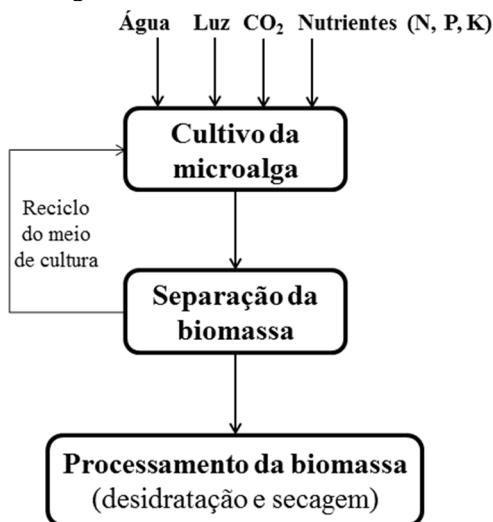
A produção de biocombustíveis a partir de microalgas ainda apresenta alguns impecilhos técnicos e econômicos, necessitando, desta forma, mais pesquisa. Apresenta, contudo, elevada potencialidade, sobretudo a nível ambiental (MOSTAFA, 2012; ROSA, 2011). Muitas espécies de microalgas são extremamente ricas em lipídios, que pode ser convertido em biodiesel utilizando tecnologias existentes. As vantagens ambientais do uso desta biomassa estão atreladas à substituição de fontes não renováveis por fontes renováveis de produção de combustíveis. As vantagens econômicas, por sua vez, relacionam-se ao crescimento de uma nova indústria de produção de energia baseada na

biorrefinação de substâncias extraídas da biomassa (MOSTAFA, 2012). Segundo Rawat et al. (2011) apud Barros et al. (2015), os biocombustíveis produzidos a partir de microalgas são vistos como a alternativa mais promissora quando comparados aos combustíveis fósseis.

2.1.4 Tecnologias para a produção de biomassa de microalgas

O processo de produção de biomassa de microalgas inclui algumas etapas, conforme esquematizado na Figura 1. Primeiramente, a seleção e isolamento da cepa são necessárias, seguido por uma unidade de produção onde as células são cultivadas. Na sequência, ocorre a separação das células do meio de cultura, processo conhecido como colheita e, por fim, a secagem (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; RASHID et al., 2014).

Figura 1 - Diagrama simplificado do processo produtivo de biomassa de microalga



Fonte: adaptado de Azeredo (2012)

A escolha da espécie de microalga a ser cultivada depende de certos parâmetros. Geralmente, a espécie selecionada precisa ser resistente a alterações ambientais, tais como nível nutricional, temperatura, suprimento de carbono, luz, pH e contaminação por

bactérias. É interessante ainda que as microalgas tenham uma cultura estável, fisiologia de crescimento e habilidade para crescer em larga escala (RASHID et al., 2014).

As microalgas podem crescer em diversos sistemas. Os sistemas autotróficos, heterotróficos e mixotróficos estão entre os mais praticados. Os sistemas autotróficos utilizam a luz como principal fonte de energia e CO₂ como fonte de carbono para o crescimento das microalgas. Diferente deste, o cultivo heterotrófico é praticado quando a espécie de microalga utiliza compostos orgânicos como fonte de carbono e energia para o desenvolvimento da cultura. O sistema mixotrófico, por sua vez, ocorre quando a microalga utiliza como fonte de carbono para seu crescimento compostos orgânicos e CO₂ (AZEREDO, 2012; MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

Com relação à escolha do sistema de cultivo a ser utilizado, Azeredo (2012) afirma que fatores tais como as características biológicas da espécie de alga a ser usada, os custos da terra, do trabalho e da energia, a disponibilidade e custo da água e nutrientes, devem ser analisados, bem como o tipo de produto final.

No que diz respeito às tecnologias empregadas para o cultivo de microalgas, pode-se citar os fotobiorreatores, que são classificados em dois grandes grupos: sistemas abertos (*raceway ponds*, lagos) e sistemas fechados (tubular, reator em placa, cônico, piramidal, fermentador) (CARDOSO et al., 2011).

2.1.5 Tecnologias de Recuperação da Biomassa

O processo de recuperação da biomassa envolve métodos de separação mecânicos, químicos, biológicos e, em menor escala, elétricos. É muito comum combinar dois ou mais destes métodos a fim de se obter maior velocidade de separação e menor custo de processo (AZEREDO, 2012; BARROS et al., 2015). Dentre as tecnologias existentes até o momento, destacam-se sedimentação, centrifugação, filtração, ultra-filtração, floculação e flotação (AZEREDO, 2012; BRENNAN; OWENDE, 2010; MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; RASHID et al., 2014; SUALI; SARBATLY, 2012).

A recuperação da biomassa é uma etapa custosa, representando cerca de 20-30 % do custo total de produção (AZEREDO, 2012; BRENNAN; OWENDE, 2010; MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; RASHID et al., 2014; SUALI; SARBATLY, 2012). Além disso, esta etapa apresenta desafios de cunho técnico e operacional, devido às baixas concentrações de biomassa encontradas nos sistemas de produção

e ao pequeno tamanho celular das microalgas (AZEREDO, 2012; RASHID et al., 2014; SUALI; SARBATLY, 2012).

A seleção do método de recuperação de biomassa apropriado depende da finalidade do produto, seu valor e suas propriedades (AZEREDO, 2012).

2.1.6 Processos de Desidratação e Secagem

Os processos de recuperação da biomassa descritos na seção anterior geram uma pasta com um conteúdo de sólidos secos na ordem de 5-20 % (AZEREDO, 2012). A etapa seguinte consiste na secagem da biomassa úmida, viabilizando a obtenção de um produto estável e estocável para posterior processamento (AZEREDO, 2012; BRENNAN; OWENDE, 2010; LIRA et al., 2012).

A secagem é um processo de intenso gasto energético e é, atualmente, um dos maiores problemas na utilização de microalgas. A etapa de secagem requer aproximadamente 85 % da energia total utilizada na produção destes micro-organismos. Desta forma, o desenvolvimento de processos de secagem com menor consumo de energia é fundamental para que a produção e utilização de microalgas tornem-se mais competitivas (AZIZ; ODA; KASHIWAGI, 2014).

Os principais métodos que vêm sendo utilizados incluem secagem ao sol, secagem em baixa pressão, secagem por pulverização (*spray drying*), liofilização, tambor de secagem, secagem em leito fluidizado ou em leito de jorro, e secagem em camada delgada (AZEREDO, 2012; BAGCHI; RAO; MALLICK, 2015; BRENNAN; OWENDE, 2010; LIRA et al., 2012). Os sistemas de secagem diferem tanto no âmbito econômico quanto na intensidade energética necessária (SHOW; LEE; CHANG, 2013). A escolha da técnica de secagem a ser empregada depende, basicamente, da escala de operação do sistema de produção e das características desejáveis para o produto final (AZEREDO, 2012).

A secagem ao sol destaca-se do ponto de vista econômico, entretanto, tecnicamente apresenta desvantagens que incluem longos períodos de secagem, a necessidade de grandes superfícies e o risco de haver perda de material. A secagem em baixa pressão é outro método que apresenta baixo custo de capital e de operação, no entanto, apresenta também baixa eficiência. Na secagem por pulverização, técnica largamente conhecida como *spray drying*, a amostra é pulverizada em uma câmara submetida a uma corrente de ar quente. Este método fornece um produto de elevada qualidade, no entanto, o custo envolvido

é alto (AZEREDO, 2012; BRENNAN; OWENDE, 2010; CARDOSO et al., 2011; DOYMAZ, 2009).

A liofilização é um método eficiente, mas que apresenta custo elevado. A técnica consiste no congelamento da biomassa recuperada, seguida pela sublimação dos cristais de gelo por aquecimento leve e gradual, sem haver descongelamento. Do ponto de vista da produção de biodiesel, este método apresenta a vantagem de facilitar processos *downstream*, tal como a extração de óleos, uma vez que além de diminuir a porcentagem de umidade da biomassa, também provoca o rompimento das células das microalgas (AZEREDO, 2012; BRENNAN; OWENDE, 2010).

O tambor de secagem proporciona a transferência de calor para a biomassa através das paredes internas do cilindro do tambor (CARDOSO et al., 2011). Este método está entre os mais recomendados para a secagem das microalgas, pois produz material de boa qualidade, é menos energético-intensivo e apresenta menores custos de investimento (AZEREDO, 2012).

A secagem em camada delgada ocorre quando o calor é fornecido ao sistema por correntes convectivas, ocasionado a evaporação do material volátil presente na amostra a ser seca. Mais de 85 % dos secadores industriais são do tipo convectivo, devido à simplicidade e custo benefício desta técnica (APRAJEETA; GOPIRAJAH; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2015; MUJUMDAR, 2015).

A técnica de secagem por leito de jorro tem sido bastante utilizada na secagem de pastas e suspensões por permitir uma secagem segura e eficiente. Além disso, esta técnica representa uma ótima opção frente a técnica de *spray drying*, por apresentar menor custo operacional e propiciar a obtenção de um produto final de alta qualidade (MARRETO, 2006).

Os dois últimos métodos citados acima serão minuciosamente comentados em tópicos futuros, por representarem o tema central deste trabalho.

2.2 SECAGEM

A secagem é definida por Perry e Green (1999) como um processo de transferência de calor e de massa onde um líquido volátil é evaporado de um sólido.

A secagem é uma técnica comumente utilizada para a preservação de alimentos e materiais biológicos, uma vez que a remoção da umidade impede o crescimento e reprodução de micro-organismos

que causam o apodrecimento e minimiza muitas reações deteriorativas. O processo de secagem possibilita longos períodos de armazenamento do material e redução de peso e volume, o que significa a redução dos custos de embalagem, armazenamento e transporte (GEANKOPLIS, 1993; LUIZ, 2012; MALAFRONTTE et al., 2012).

2.2.1 Fenomenologia envolvida na secagem

A seguir, uma breve apresentação acerca dos fenômenos de transferência de calor e de massa, ambos presentes no processo de secagem.

2.2.1.1 Transferência de calor

A transferência de calor ocorre sempre que, em um dado sistema, uma diferença de temperatura entre as regiões deste sistema seja observada. Durante este fenômeno, a energia se move de uma região de temperatura mais elevada para uma região de menor temperatura através dos seguintes modos: condução, convecção ou radiação. A combinação de dois ou até dos três modos de transferência de calor é bastante comum nos processos de engenharia química. A seguir, uma abordagem acerca da transferência de calor por condução e por convecção será apresentada. A transferência de calor por radiação não será abordada neste trabalho (ASHRAE, 2009; BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2002; GEANKOPLIS, 1993; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993; WELTY et al., 2008).

2.2.1.1.1 Condução

Na condução, calor pode ser transferido através de sólidos, líquidos e gases através de dois mecanismos. O primeiro e mais comum, é o mecanismo de interação molecular, em que o calor é conduzido através da transferência de energia entre moléculas adjacentes. As moléculas mais quentes, que tem maior energia, cedem energia para as moléculas que se encontram em um nível inferior de energia. Este tipo de transferência está presente, em algum grau, em todos os sistemas que apresentem gradiente de temperatura entre as moléculas de um sólido, líquido ou gás.

O segundo mecanismo de transferência de calor por condução é através de elétrons livres. Este mecanismo é significativo principalmente em sólidos puros e metálicos, onde a concentração de elétrons livres é

grande (GEANKOPLIS, 1993; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993; WELTY et al., 2008).

A relação básica de transferência de calor por condução expressa o fluxo de calor de maneira proporcional ao gradiente de temperatura, onde a constante de proporcionalidade é a condutividade térmica (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993; MUJUMDAR, 2015). Essa generalização é chamada de Lei de Fourier e sua forma mais genérica está apresentada na Equação 1 (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

$$\frac{q_{cd}}{A} = -\kappa \nabla T \quad (1)$$

Onde:

q_{cd} : taxa de transferência de calor condutivo (W);

A: área normal à direção do fluxo de calor (m²);

κ : condutividade térmica (W m⁻¹ K⁻¹);

T: temperatura (K).

O termo $\frac{q}{A}$ é chamado de fluxo de calor (W m⁻²) e o sinal negativo na Equação 1 é requerido porque se o fluxo de calor é positivo em determinada posição, a temperatura diminui nesta direção (WELTY et al., 2008).

A condutividade térmica é uma propriedade que depende da temperatura e da composição do material. Nos casos de gases submetidos a altas pressões, esta propriedade pode variar também com a pressão. Equações empíricas podem ser utilizadas para a determinação da condutividade térmica (MUJUMDAR, 2015). Em geral, gases têm valores baixos de condutividade térmica, líquidos, valores intermediários, e sólidos metálicos apresentam valores altos para esta propriedade (GEANKOPLIS, 1993).

2.2.1.1.2 Convecção

A transferência de calor devido à convecção envolve a troca de energia entre uma superfície e um fluido adjacente. Existem duas classificações principais para a transferência de calor por convecção e estão relacionadas com a força motriz causadora do escoamento do fluido. A convecção forçada é usada para descrever as situações em que

um fluido escoar através de uma superfície devido a um agente externo, tal como um ventilador ou uma bomba. Já a convecção livre ou natural, designa os processos em que a circulação do fluido ocorre devido à diferença de massa específica resultante da variação de temperatura ao longo do fluido (GEANKOPLIS, 1993; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993; WELTY et al., 2008).

A equação para a transferência de calor por convecção foi primeiramente expressa por Newton em 1701 e é conhecida como a Lei de Newton do resfriamento (Equação 2) (WELTY et al., 2008).

$$\frac{q_{cv}}{A} = h\Delta T \quad (2)$$

Onde:

q_{cv} : taxa de transferência de calor convectivo (W);

A: área normal à direção do fluxo de calor (m^2);

h: coeficiente de transferência de calor convectivo ($W m^{-2} K^{-1}$);

ΔT : gradiente de temperatura entre a superfície e o fluido (K).

O coeficiente h é função da geometria do sistema, das propriedades do fluido, da velocidade de fluxo e do gradiente de temperatura. Em muitos casos, este coeficiente pode ser estimado por meio de correlações empíricas (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

2.2.1.2 Transferência de massa

A transferência de massa é um fenômeno que aparece em sistemas com dois ou mais componentes, cujas concentrações variam de ponto a ponto. Neste caso, a tendência natural é que a massa seja transferida de modo a minimizar a diferença de concentração no sistema (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993; WELTY et al., 2008).

O mecanismo de transferência de massa depende da dinâmica do sistema. Massa pode ser transferida pelo movimento das moléculas de um fluido em repouso ou pode ser transferida de uma superfície para um fluido em movimento. Esses dois distintos modos de transporte, transferência de massa molecular e transferência de massa convectiva, são análogos à transferência de calor por condução e transferência de calor por convecção. Assim como no caso da transferência de calor, os dois mecanismos de transferência de massa frequentemente agem de forma simultânea (WELTY et al., 2008).

2.2.1.2.1 Difusão

A transferência de massa difusiva ocorre em consequência de uma diferença de concentrações espacial. A difusão é análoga à transferência de calor por condução embora seja um fenômeno mais complexo por ocorrer em misturas. O componente com diferença de concentração espacial tende a se difundir, de modo a igualar as concentrações e minimizar o gradiente (ASHRAE, 2009; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993).

A equação básica que rege o fluxo difusivo é conhecida como primeira Lei de Fick e está apresentada na Equação 3, considerando uma mistura binária (ASHRAE, 2009; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993; WELTY et al., 2008).

$$J_i = -D_{ef} \nabla c_i \quad (3)$$

Onde:

J_i : fluxo difusivo molar da espécie i ($\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$);

D_{ef} : coeficiente de difusão de massa ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

C_i : concentração do componente i (mol m^{-3}).

O fluxo difusivo (J_i) é assumido como sendo proporcional ao gradiente de concentração (∇c_i). O sinal negativo indica que o gradiente de concentração é negativo na direção da difusão (ASHRAE, 2009).

O coeficiente de difusão de massa (D_{ef}), também conhecido como difusividade efetiva de massa, é definido como a taxa de transferência de uma substância que se difunde através de um espaço com gradiente de concentração, por unidade de área. Este parâmetro depende da pressão, temperatura e composição do sistema. Valores experimentais para a difusividade de gases, líquidos e sólidos podem ser encontrados na literatura. Os coeficientes de difusão são geralmente mais elevados para os gases (no intervalo de 5×10^{-6} até $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) que para os líquidos (no intervalo de 10^{-10} até $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), que são mais elevados que os valores relatados para os sólidos (no intervalo de 10^{-14} até $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Na ausência de dados experimentais, expressões semi teóricas que fornecem boas aproximações foram desenvolvidas para gases e líquidos (WELTY et al., 2008).

2.2.1.2.2 Convecção

Transferência de massa convectiva envolve mecanismos de transferência de massa por difusão molecular e movimento do fluido. O movimento do fluido em uma região adjacente à superfície de transferência de massa pode ser laminar ou turbulento, dependendo da geometria da superfície e das condições de fluxo (ASHRAE, 2009).

A transferência de massa entre um fluido em movimento e uma superfície ou entre fluidos imiscíveis em movimento e separados por uma interface é frequentemente auxiliada pelas características do fluido em movimento. Este modo de transferência é conhecido como transferência de massa convectiva, em que a transferência sempre vai da região de maior concentração para uma região de menor concentração da espécie que está sendo transferida. Transferência convectiva depende das propriedades de transporte e das características dinâmicas do fluido em movimento.

A equação para a transferência de massa convectiva, generalizada de maneira análoga à Lei de Newton do resfriamento está apresentada na Equação 4.

$$N_i = k_c (c_{is} - c_{i\infty}) \quad (4)$$

Onde:

N_i : fluxo molar de transferência de massa da espécie i ($\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$);

k_c : coeficiente convectivo de transferência de massa (m s^{-1});

c_{is} : concentração da espécie i na interface sólido-meio de secagem (mol m^{-3});

$c_{i\infty}$: concentração da espécie i no meio de secagem (mol m^{-3}).

Da mesma forma que observada para o coeficiente convectivo de transferência de calor, o coeficiente convectivo de transferência de massa está relacionado às propriedades do fluido, às características dinâmicas do fluido e à geometria do sistema em estudo (WELTY et al., 2008).

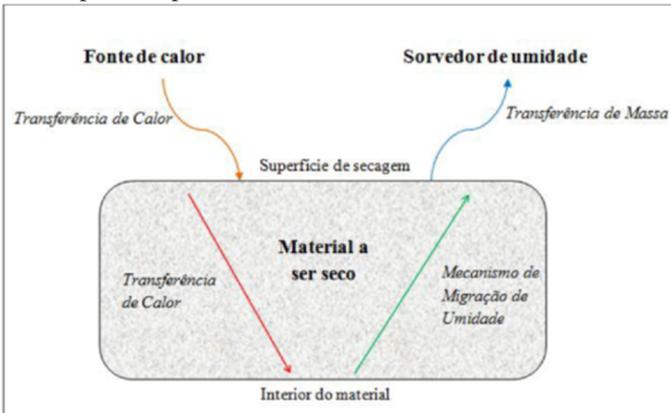
2.2.2 Aspectos gerais da secagem

O processo de secagem é uma operação complexa que envolve transferência de calor e de massa entre o material a ser seco e o meio secante. O calor é transferido do ambiente para a superfície do material

a ser seco, por convecção. Este fenômeno, combinado com a transferência de calor no interior do material, por condução, eleva a temperatura do mesmo ocasionando a evaporação da água. Simultaneamente, ocorre a migração da umidade interna para a superfície do material por um mecanismo de secagem com a subsequente evaporação de água devido ao processo anterior (MUJUMDAR, 2015; PERUSSELLO, 2013). O vapor formado é arrastado por um sorvedor, reduzindo a umidade do meio de secagem e aumentando a eficiência do processo.

A remoção de água na forma de vapor a partir da superfície do material depende de condições externas: temperatura, umidade e fluxo de ar, área de superfície exposta e pressão. O movimento da umidade no interior do sólido é função da natureza física do material, sua temperatura e teor de umidade. Qualquer um dos parâmetros apresentados anteriormente pode regular a velocidade de secagem (KEEY, 1972; STRUMILLO, 1986). Um esquema do processo de secagem é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema do processo de secagem e da migração de umidade do interior para a superfície do sólido



Fonte: Alonso (2001) apud Santos, 2013

Quando um material úmido é submetido à secagem, a transferência de calor é resultado de um processo de convecção, condução ou radiação, podendo ainda, em alguns casos, ser o resultado da combinação destes. A transferência de calor depende de condições de temperatura, umidade do ar, fluxo e direção do ar e área de exposição do material. Com relação à transferência de massa, o movimento interno da

umidade do material é função da natureza física, podendo ser influenciada pela porosidade do material, composição, temperatura e conteúdo de umidade do material (STRUMILLO, 1986).

2.2.2.1 Cinética de secagem

O processo de secagem apresenta, na maioria dos casos, um comportamento generalizado. Na Figura 3 e Figura 4 podem ser visualizadas curvas típicas de secagem, uma na base do teor de umidade *versus* o tempo e a outra na base da velocidade de secagem *versus* o tempo. O primeiro gráfico é a forma que se deve obter com os dados de ensaios de secagem, já o segundo, é o gráfico que se obtém derivando os dados do primeiro gráfico.

As curvas de secagem permitem prever o momento do processo em que o teor de umidade desejado é atingido, evitando a perda na qualidade do produto. Outra vantagem do uso destas curvas é que as mesmas contêm informações importantes para o desenvolvimento do processo e para o dimensionamento de equipamentos (SILVA, 2013).

2.2.2.2 A divisão da secagem em períodos

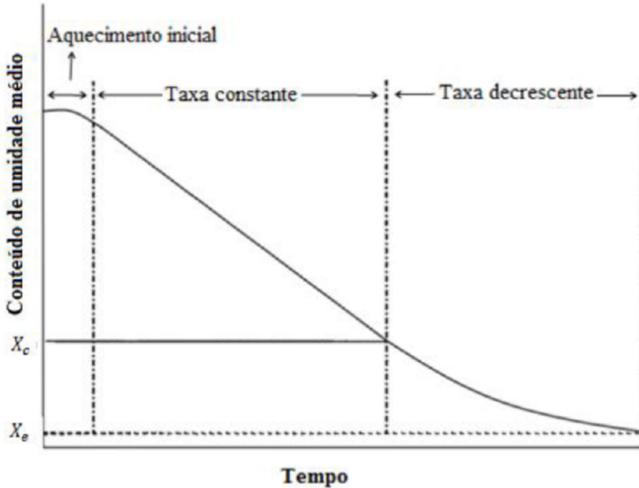
Conforme se pode observar nas Figuras 3 e 4, as curvas estão relacionadas aos mecanismos da secagem, que divide o processo em períodos.

O primeiro período consiste no aquecimento do material a ser seco e acontece imediatamente após o contato deste com o meio de secagem. Este período segue até que o regime permanente seja atingido. Neste regime, a temperatura da superfície do sólido molhado é a temperatura de bulbo-úmido do meio secante, assumindo os efeitos de condução e radiação como sendo negligenciáveis. Uma vez atingida, esta temperatura permanece constante, assim como a velocidade de secagem. Este período é nomeado de período de secagem à taxa constante, durante o qual, toda a superfície exposta do sólido está saturada de água. A superfície do produto é constantemente alimentada pela migração interna de umidade que compensa a evaporação superficial. A secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa de líquido, sem haver influência direta do sólido na velocidade de secagem.

O fim do período de taxa constante corresponde ao instante em que a migração interna de água para a superfície não é suficiente para compensar a taxa de evaporação da água livre. Neste ponto, o sólido

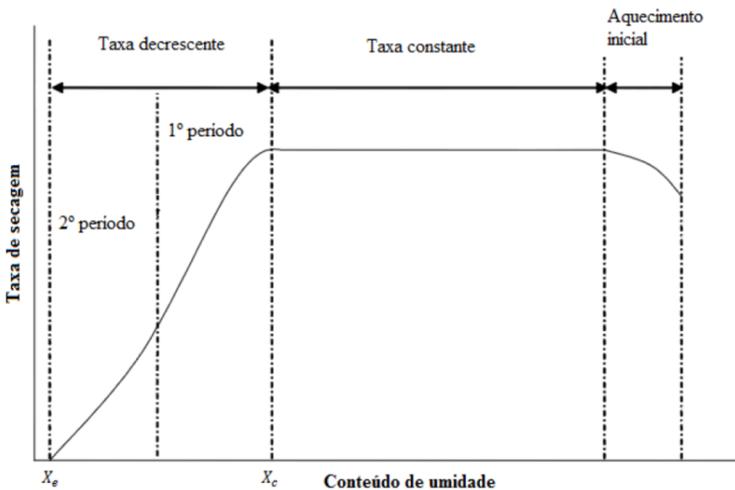
atinge o teor de umidade crítico, que depende das condições de processo empregadas.

Figura 3 - Curvas de secagem típica em condições constantes de secagem, conteúdo de umidade em função do tempo



Fonte: Xue (2004) apud Santos (2013)

Figura 4 - Curva de secagem típica em condições constantes de secagem, velocidade de secagem em função do conteúdo de umidade



Fonte: Xue (2004) apud Santos (2013)

Além deste ponto, ocorre o período à taxa decrescente, em que a temperatura da superfície eleva-se e a velocidade de secagem se reduz rapidamente. Este período tende a ser mais longo que o período anterior, embora a remoção de umidade seja muito menor. Neste período, além dos mecanismos externos (convecção de calor e transferência de massa), deve ainda ser considerada a dinâmica interna da água no sólido.

Dependendo das características físicas do material, o período à taxa decrescente é dividido em duas regiões. No primeiro período de taxa decrescente, a superfície fica mais pobre em líquido, pois a taxa de transferência de líquido para a superfície é menor que a taxa da transferência de massa de umidade para o meio secante. O segundo período de taxa decrescente inicia quando a superfície do sólido não possui mais zonas saturadas. Neste período, toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido e a velocidade de secagem é governada pela transferência de calor e massa difusivas. À medida que o teor de umidade continua diminuindo, a velocidade de secagem aproxima-se de zero até atingir o teor de umidade de equilíbrio, cessando o processo de secagem.

O teor de umidade de equilíbrio é atingido quando a pressão de vapor sobre o sólido é igual à pressão do vapor no gás secante e representa o menor teor de umidade atingível no processo de secagem (FOUST et al., 1980; KEEY, 1972; LUIZ, 2012; PERRY; GREEN, 1999; STRUMILLO, 1986).

2.2.2.3 Mecanismos de secagem

Os mecanismos de cálculo da velocidade de secagem diferem quando se trata do período constante ou decrescente. No primeiro período, os fenômenos de transferência de calor e massa são analisados na superfície do material e ar de secagem, enquanto que no segundo período, as análises baseiam-se nas transferências internas que governam o processo (PARK et al., 2007).

2.2.2.3.1 *Período de secagem à taxa constante*

No período de secagem a taxa constante, a superfície do material a ser seco está completamente umedecida e a remoção de água ocorre de maneira similar à evaporação de um líquido, independentemente da natureza do sólido. Durante todo este período, a velocidade do movimento da umidade no interior do sólido é suficiente para manter a superfície saturada.

Assumindo apenas a transferência de calor do meio de secagem para o sólido por convecção e a transferência de massa da superfície do sólido para a fase gasosa, o fluxo molar de água evaporada é calculado através da Equação 4, anteriormente apresentada no tópico de transferência de massa convectiva (GEANKOPLIS, 1993; PARK et al., 2007; SANTOS, 2013; STRUMILLO, 1986).

2.2.2.3.2 Período à taxa decrescente

Durante o período à taxa decrescente, a superfície do sólido não está mais completamente umedecida. Neste caso, a velocidade de secagem será função da velocidade com que a umidade interna do sólido migra para a superfície, através de diferentes mecanismos, sendo a difusão e a capilaridade os modelos comumente propostos. A condução de calor através do sólido também influencia na velocidade de secagem observada para este período (STRUMILLO, 1986; WILLIAMS-GARDNER, 1971).

a) Movimento da umidade – mecanismo da difusão

Este mecanismo ocorre durante a secagem de sólidos homogêneos, como os sólidos orgânicos fibrosos, as substâncias gelatinosas e as tortas porosas, quando estão sendo secos abaixo do teor de umidade crítico (FOUST et al., 1980). Neste modelo, a resistência à transferência de massa do vapor da superfície para o meio secante pode ser desconsiderada e a difusão da água no interior do sólido controla a velocidade de secagem (GEANKOPLIS, 1993).

A expressão matemática que representa este mecanismo é a Equação 3, anteriormente apresentada. Este modelo despreza os efeitos da transferência de calor devido ao movimento de umidade do sólido. Muitos sólidos alteram as características de seus poros durante a secagem e a distribuição da umidade no teor de umidade crítico dificilmente é uniforme (FOUST et al., 1980).

b) Movimento da umidade – mecanismo de capilaridade

Este mecanismo governa o movimento da umidade em sólidos granulados ou em materiais que tem uma estrutura com poros abertos. Nestes casos, o movimento do líquido dentro do sólido é consequência das forças resultantes das diferenças entre a pressão hidrostática e os

efeitos da tensão superficial (FOUST et al., 1980; GEANKOPLIS, 1993; PERRY; GREEN, 1999).

2.2.2.4 Condições externas – meio de secagem

As condições externas referem-se às propriedades psicrométricas do ar de secagem.

2.2.2.4.1 Umidade do ar

A umidade é um importante parâmetro do ar de secagem, pois influencia diretamente no potencial para transferência de umidade do sólido para o meio externo.

A umidade relativa (UR) pode ser definida como a relação entre a fração molar do vapor d'água no ar e a sua fração correspondente caso estivesse na condição de saturação, à mesma pressão e temperatura. Considerando que a mistura ar-vapor d'água à pressão atmosférica siga o comportamento dos gases ideais, a umidade relativa é definida como sendo a razão entre a pressão parcial do vapor d'água (P) e a pressão de vapor d'água na saturação (P_{sat}), conforme Equação 5 (PARK et al., 2007; SANTOS, 2013).

$$UR = \frac{P}{P_{sat}} \quad (5)$$

2.2.2.4.2 Temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido

As condições do ar de secagem podem ser especificadas pelas temperaturas de bulbo seco (T_{bs}) e bulbo úmido (T_{bu}). A temperatura de bulbo seco é medida com um termômetro comum. A temperatura de bulbo úmido, por sua vez, é indicada por um termômetro cujo bulbo está coberto por uma mecha de algodão embebida em água. Ciente das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido, pode-se determinar outros parâmetros psicrométricos como a pressão parcial do vapor d'água, o ponto de orvalho e a umidade específica (PARK et al., 2007; SANTOS, 2013).

2.2.2.5 Condições internas

2.2.2.5.1 Teor de umidade do sólido

O teor de umidade é a relação entre a massa de água presente no material e a massa total do material. Esse parâmetro representa a quantidade de água que pode ser removida do material sem alteração na estrutura molecular do mesmo (PARK et al., 2007).

O teor de umidade pode ser expresso de duas maneiras: base seca (X_{bs}) quando for determinado em relação à massa seca do produto (Equação 6), ou base úmida (X_{bu}) quando a determinação for feita em relação à massa total do produto (Equação 7).

$$X_{bs} = \frac{m_A}{m_{ms}} \quad (6)$$

$$X_{bu} = \frac{m_A}{m_{mu}} \quad (7)$$

Onde:

m_A : massa de água no material (kg);

m_{ms} : massa de material seco (kg);

m_{mu} : massa de material úmido (kg).

O conteúdo de umidade de equilíbrio de um material corresponde ao conteúdo de umidade que permanece no material quando este alcança a condição de equilíbrio com o meio circundante. No processo de secagem, este valor representa o conteúdo de umidade do produto que é alcançado ao fim da secagem para uma dada condição de temperatura e umidade relativa (UR). Seu conhecimento é importante porque representa o menor valor de umidade que o material pode ser seco, para as condições de operação consideradas. A umidade de equilíbrio (X_{eq}) depende essencialmente da natureza do material, pela maneira como a água está retida ou ligada ao produto e é função das condições do ar de secagem (temperatura e umidade) (PERUSSELLO, 2013; SANTOS, 2013).

2.2.2.5.2 Isotermas de equilíbrio

Conforme visto no item anterior, a qualidade do produto seco depende da umidade de equilíbrio que é, por sua vez, função de uma série de parâmetros. Dentre estes, destaca-se a umidade relativa do ar em equilíbrio higroscópico com o produto, sendo esta umidade relativa conhecida como atividade de água (a_w) (MULET et al., 2002).

A relação entre atividade de água e umidade relativa permite prever quais materiais biológicos irão ganhar ou perder umidade se expostos ao ar com determinada umidade. O conhecimento da atividade de água é de extrema importância para garantir a estabilidade e a qualidade do material biológico. Este fator é uma medida da quantidade de moléculas de água livre ou ativas obtida em relação à pressão de vapor da água pura (DITCHFIELD, 2000).

A atividade de água está relacionada com a umidade relativa do ambiente (UR) através da Equação 8, para baixas pressões e temperaturas no equilíbrio. Sua definição considera a razão entre a pressão parcial de vapor d'água no material (P) e a pressão de vapor d'água pura (P_0), ambas na mesma temperatura.

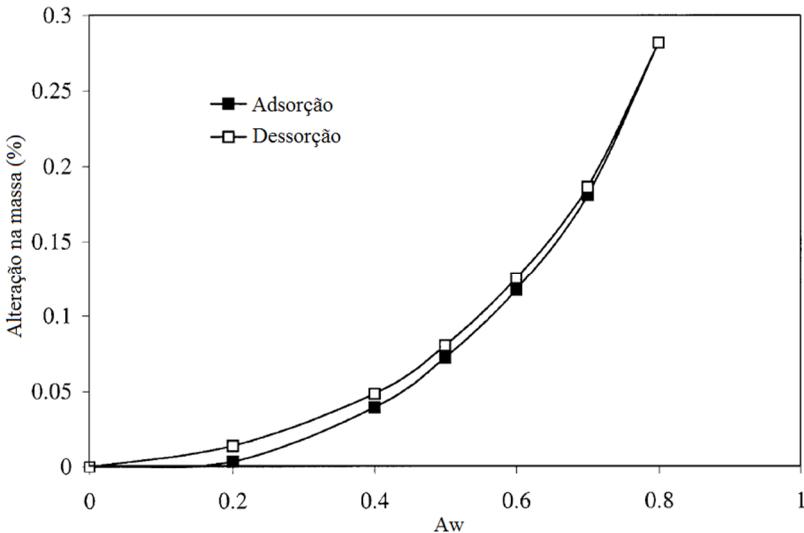
$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{UR}{100} \quad (8)$$

O estudo da atividade de água pode ser feito através de isotermas de sorção. As isotermas de sorção são curvas de equilíbrio que representam a relação entre a atividade de água ou a umidade relativa do meio de secagem e o correspondente conteúdo de umidade do material em equilíbrio, para uma dada temperatura (DITCHFIELD, 2000; OLIVEIRA, 2006; PARK et al., 2007; PERUSSELLO, 2013). Uma vez que esta relação depende de diversos fatores (estrutura física da superfície do material, composição química e afinidade com a água), cada material apresenta características distintas de sorção de umidade e faz-se necessária a determinação experimental das curvas de sorção para cada tipo de produto (LUIZ, 2012).

A isoterma de sorção de umidade pode se apresentar de duas maneiras, como isoterma de adsorção ou como isoterma de dessorção. A primeira forma é obtida quando um material totalmente seco é colocado em atmosferas com diferentes incrementos de umidade relativa, sendo medido o aumento de peso deste material devido ao ganho de água. A isoterma de dessorção por sua vez, é obtida quando o material

inicialmente úmido é colocado sob condições idênticas às condições atmosféricas criadas para a adsorção, sendo medido, neste caso, a diminuição de peso do material, provocada pela perda de água determinada durante a desidratação. As curvas de adsorção e dessorção não coincidem e a diferença entre as isotermas é atribuída ao fenômeno de histerese (DITCHFIELD, 2000; OLIVEIRA, 2006; PARK et al., 2007). Geralmente, as isotermas de adsorção são requeridas para a observação de produtos higroscópicos e as de dessorção são usadas na investigação do processo de secagem (PERUSSELLO, 2013). Curvas de adsorção e dessorção para a *Spirulina*, na temperatura de 25°C são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Curvas de adsorção e dessorção para a *Spirulina*, na temperatura de 25°C



Fonte: Desmorieux e Decaen (2005)

O conhecimento das curvas de sorção é importante para definir limites de desidratação do produto (LUIZ, 2012; PARK et al., 2007; SANTOS, 2013), além de fornecer informações sobre a estabilidade e tempo de prateleira e investigar as características estruturais do mesmo (VELÁZQUEZ-GUTIÉRREZ et al., 2015). As curvas de sorção são ainda essenciais para o projeto e otimização de equipamentos de secagem e, através das isotermas de equilíbrio higroscópico, pode-se

estimar o requerimento de energia necessário para o processo de secagem (HASSINI et al., 2015; SANTOS, 2013).

Com o intuito de prever o comportamento das isotermas, diversos autores propuseram modelos de ajuste para isotermas de sorção (MULET et al., 2002).

2.2.3 Secagem convectiva

Conforme apresentado, a secagem convectiva é largamente utilizada, devido à sua simplicidade e custo benefício. Na técnica de secagem convectiva, uma batelada do material a ser seco é submetida a uma corrente de ar quente paralela ou perpendicular a mesma. Esta operação unitária utiliza os conceitos anteriormente expostos para explicar a transferência de calor e de massa que ocorre simultaneamente entre o material que está sendo seco e o ar de secagem. Neste caso, o calor é suprido pelo ar, que arrasta a umidade evaporada.

Velic et al. (2004) investigaram a influência da velocidade de escoamento horizontal do ar (0,64, 1,00, 1,50, 2,00, 2,50 e 2,75 m s⁻¹) na cinética de secagem convectiva de maçãs. Os experimentos foram realizados à temperatura de 60°C e umidade relativa média de 9 %. Os autores concluíram que um acréscimo na velocidade de fluxo do resultou no aumento da taxa de remoção de umidade.

Babalís e Belessiotis (2004) estabeleceram a influência das características do ar de secagem na secagem de figos. Os testes foram realizados em um secador túnel de escala laboratorial. As condições do ar investigadas foram a temperatura (55-85°C) e o fluxo de ar (0,5-3 m s⁻¹). Segundo a pesquisa dos autores, a cinética de secagem é mais significativamente afetada pela temperatura, constatando que a velocidade do fluxo de ar tem uma influência limitada no processo de secagem.

Seiiedlou et al. (2010) estudaram os efeitos da temperatura (50, 60 e 70°C) e velocidade (0,6, 1,2 e 1,8 m s⁻¹) do ar de secagem na cinética de secagem de fatias de maçã, usando um secador de bandejas. Os autores observaram que a secagem das fatias de maçã ocorreu no período de secagem à taxa decrescente e que a velocidade de secagem aumentou com o aumento da temperatura e velocidade do ar de secagem.

Nos últimos anos, uma grande quantidade de trabalhos na área de secagem convectiva tem sido observada. Erbay e Icier (2010) revisaram os estudos experimentais publicados nos últimos 10 anos no ramo de

secagem de alimentos. Maiores informações podem ser encontradas em seu trabalho.

2.2.4 Secagem em leito de jorro

2.2.4.1 Aspectos gerais sobre o leito de jorro

O pioneirismo no uso da técnica do leito de jorro é atribuído a Gishler e Mathur que, em 1954 desenvolveram um secador do tipo leito de jorro para a secagem de trigo (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Atualmente, é aplicado a uma grande variedade de processos industriais, como recobrimento de partículas, granulação, reações heterogêneas gás-sólido e na secagem de pastas e suspensões (BITTI, 2012).

O leito de jorro convencional, tal qual idealizado por Gishler e Mathur, é composto por uma câmara cilíndrica com base cônica, a qual possui em sua extremidade inferior um pequeno orifício. Outras configurações de leito também podem ser empregadas, com geometria totalmente cônica, cilíndrica, ou até mesmo retangular.

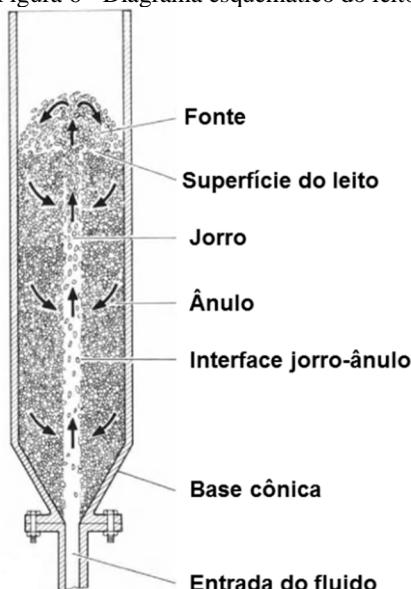
O regime de jorro é estabelecido pela entrada do fluido de jorro, geralmente ar, através do orifício localizado na extremidade inferior da base cônica. A injeção do fluido provoca o movimento ascendente das partículas sólidas presentes no interior da câmara com a formação de um canal central, região denominada de região de jorro. Ao redor do canal central, é observada a presença de um leito denso de partículas, que se deslocam contra o fluxo ascendente de ar, traçando uma trajetória parabólica em relação à região central do equipamento, denominada de ânulo ou região anular. Uma vez que as partículas provenientes da região de jorro atingem a superfície do leito, conhecida como região de fonte, ocorre a desaceleração das mesmas, resultando em sua queda sobre a região anular. Por fim, essas partículas descreverão uma trajetória cíclica de volta para a região do jorro (MATHUR; EPSTEIN, 1974). A movimentação das partículas em um leito de jorro convencional é esquematicamente ilustrada na Figura 6.

O regime fluidodinâmico observado em equipamentos do tipo leito de jorro propicia uma série de vantagens durante sua aplicação. A excelente mistura dos sólidos e o intenso contato fluido-sólido estão entre as características que permitem uma secagem segura e eficiente. Ainda segundo o mesmo autor, a secagem de pastas em leito de jorro tem recebido atenção de pesquisadores ao redor do mundo por apresentar vantagens com relação à secagem por *spray drying*, uma vez que apresenta menor custo operacional, elevada capacidade de secagem

e possibilita a obtenção de um produto final homogêneo de alta qualidade.

No entanto, um aprofundamento no entendimento do comportamento fluidodinâmico do leito na presença de pastas é necessário, visando contornar algumas desvantagens deste tipo de aplicação. As frequentes instabilidades do regime fluidodinâmico geradas pela alimentação de pastas, a ocorrência de fenômenos de aglomeração de partículas e o elevado acúmulo de pó no interior da câmara de secagem prejudicam, senão inviabilizam o emprego industrial da técnica de leito de jorro (MARRETO, 2006).

Figura 6 - Diagrama esquemático do leito de jorro



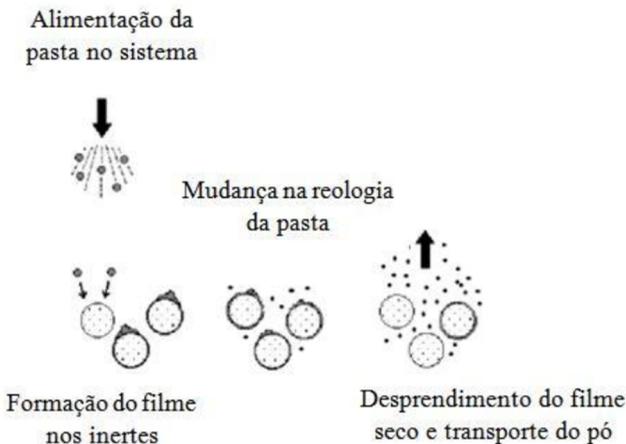
Fonte: Mathur e Epstein, 1974

2.2.4.2 Descrição e análise do processo de secagem de pasta

Basicamente, o processo de secagem de pasta em leito de jorro consiste em atomizar o material pastoso no interior do equipamento, revestindo uniformemente as partículas inertes. Na sequência, ocorrem mudanças na reologia da pasta que culminam no desprendimento do filme seco seguido do transporte do pó (Figura 7).

A renovação da película da pasta ocorre de forma contínua, devido à colisão e abrasão causadas pelo movimento e choque dos inertes. Inicialmente, um filme líquido deposita-se sobre as partículas de inerte, ficando aderido devido à intensa força de coesão entre as partículas e o filme. Ao longo do processo, os fenômenos de transferência convectiva de calor a partir da corrente de ar, bem como a transferência de calor por condução entre o inerte e o filme, secam a película de líquido inicialmente formado sobre as partículas. Este processo continua até que o filme esteja suficientemente seco e as colisões entre as partículas e entre as partículas e a câmara de secagem causem a quebra da película, com a formação do pó que será transportado pelo sistema de exaustão e coletado pelo sistema de separação acoplado à câmara de secagem, completando o processo (NASCIMENTO, 2013; PALLAI-VARSÁNYI; TÓTH; GYENIS, 2007).

Figura 7 - Esquema geral da secagem de pastas utilizando partículas inertes como suporte



Fonte: Grbavcic, Arsenijevic, Garic-Grulovic (2004) apud Nascimento (2013)

2.2.4.3 Estado da arte

A secagem de pastas e suspensões pela técnica de leito de jorro, utilizando partículas inertes, tem sido bastante estudada nos últimos vinte anos. Os primeiros estudos foram desenvolvidos por um grupo de pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Leningrado, no final de

década de 60, com o objetivo de secar lacas e tintas (MEDEIROS et al., 2001; NASCIMENTO, 2013).

Almeida (2009) fez um levantamento dos trabalhos existentes na literatura sobre a secagem de pastas em leite de jorro. No Quadro 1 é apresentada a lista de trabalhos existentes na literatura sobre a secagem de pastas em leitos de jorro com as respectivas pastas testadas.

Quadro 1 - Trabalhos envolvendo a secagem de pastas em leite de jorro

(continua)

Referências	Pastas secas
Schneider e Bridgwater (1989)	Alumina
Schneider e Bridgwater (1993)	
Markowski (1993)	Antibióticos
Kudra et al. (1989)	Carbonato de cálcio
Zorana et al. (2004)	Carbonato de cálcio
Szentmarjay e Pallai (1989)	Carbonato de cobalto
Szentmarjay e Pallai (1989)	Carbonato de zinco
Oliveira (2006)	Cianobactéria (<i>Spirulina platensis</i>)
Schneider e Bridgwater (1989)	Cloreto de sódio
Kudra et al. (1989)	Dióxido de zinco
Barrett e Fane (1989)	Efluente de fábrica de goma
Cordeiro e Oliveira (2005)	Extrato de folhas
Tia et al. (1995)	Farinha de arroz
Marreto et al. (2006)	Fármacos
Zorana et al. (2004)	Fungicida
Cunha (1999)	Goma xantana
Spitzner Neto et al. (2002)	
Cunha et al. (2000)	Goma xantana
Reyes (1993)	Hidróxido de alumínio
Barrett e Fane (1989)	Leite desnatado
Morris, 1990 e Rodrigues (1993)	Levedura
Rocha et al. (2004)	Levedura
Passos et al. (2004)	Licor negro
Costa Jr. et al. (2006)	
Cunha (1999)	Ovo homogeneizado
Spitzner Neto (2001)	
Abarca (2001)	
Spitzner Neto et al. (2002)	
Bacelos et al. (2005)	
Kudra et al. (1989)	Óxido de zinco

Quadro 1 - Trabalhos envolvendo a secagem de pastas em leito de jorro
(conclusão)

Referências	Pastas secas
Shuhama et al. (2003)	Pigmento
Markowski (1992)	Plasma de sangue animal
Kudra et al. (1989)	Plasma de sangue animal
Medeiros et al. (2002) Medeiros et al. (2004)	Polpa de fruta
Marmo (2007)	Polpa de fruta
Pham (1983) Ré (1986) Ré e Freire (1989) Oliveira (1996) Spitzner Neto (1997) Spitzner Neto et al. (2002)	Sangue animal
Correia (1996)	Pasta residual de soja

Fonte: adaptado de Almeida (2009)

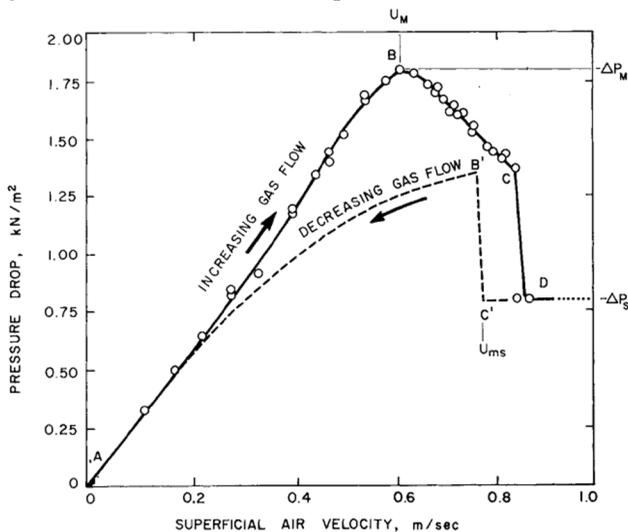
2.2.4.4 Fluidodinâmica do leito de jorro

Os parâmetros fluidodinâmicos de maior importância no estudo dos regimes de jorro são a altura máxima de jorro estável (H_{\max}), a velocidade mínima de jorro (v_{mj}) e a queda de pressão estável (ΔP) (BITTI, 2012; MARRETO, 2006). Os dois últimos parâmetros são obtidos por meio da curva característica do equipamento de jorro (Figura 8), conforme metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974).

Inicialmente, aplicando-se baixas vazões, o gás simplesmente escoava pelas partículas em um leito fixo. Este comportamento é representado pelo segmento AB na Figura 8. Nesta região a queda de pressão aumenta com a vazão de escoamento. O seguinte aumento da vazão de ar promove a formação de uma cavidade no centro do leito, com a compactação das partículas ao redor da cavidade. Esta compactação passa a oferecer grande resistência ao escoamento de ar, ocasionando um aumento na queda de pressão, até que, no ponto B, ocorre a queda de pressão máxima (ΔP_{\max}). A velocidade superficial correspondente é a velocidade mínima de fluidização (v_{mf}). A partir deste ponto, o aumento da vazão de ar diminui a queda de pressão, devido à altura do jorro interno ser maior que os sólidos compactados acima deste. Este ponto é representado no gráfico pela letra C e é chamado de jorro incipiente. Qualquer acréscimo na vazão de gás

resulta em uma redução rápida na queda de pressão até que o jorro estável é estabelecido, ponto D da Figura 8.

Figura 8 - Curva fluidodinâmica típica



Fonte: adaptado de Mathur e Epstein, 1974

A velocidade de jorro incipiente (v_{ji}) (ponto C) e a velocidade de início de jorro (v_{ij}) (ponto D) são de difícil reprodução. A velocidade mínima de jorro (v_{mj}) é mais facilmente reproduzível e é obtida diminuindo lentamente a vazão do fluido até chegar ao ponto C', que representa a condição de mínimo jorro. A partir deste ponto, uma ligeira redução da velocidade do ar ocasiona o colapso do jorro e um aumento na queda de pressão até ponto B'. Além deste ponto, a diminuição da taxa de fluxo faz com que a pressão caia de forma constante ao longo BA (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

2.2.4.4.1 Velocidade mínima de jorro

A v_{mj} é a velocidade mínima do fluido necessária para a manutenção do regime de jorro. Este parâmetro fluidodinâmico depende da geometria do sistema bem como das propriedades do fluido e das partículas (MATHUR; EPSTEIN, 1974; OLIVEIRA, 2006). Em uma câmara cilíndrica e para um determinado material, os valores de v_{mj}

diminuem com o aumento do diâmetro da câmara de secagem e com a diminuição da altura do leito fixo de sólidos.

Ainda relacionado à velocidade, o conhecimento de dois outros valores é de extrema importância. De um lado, a v_{ji} , que representa a velocidade de fluido necessária para iniciar o regime de jorro e cujo conhecimento é de grande importância para o projeto do soprador de ar a ser empregado. Os valores de v_{ji} são sempre mais elevados em relação aos de v_{mj} , devido à demanda energética adicional para dar início ao regime de jorro. No outro extremo, existe um limite superior ou um valor máximo da velocidade mínima de jorro (v_{max}), para o qual o leito de sólidos sofre a transição do regime de jorro para regimes de fluidização (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

2.2.4.4.2 *Altura máxima de jorro estável*

A altura máxima de jorro estável (H_{max}) é definida como a altura de partículas inertes, acima da qual não é possível observar a ocorrência do regime de jorro e sim uma fluidização de má qualidade (MARRETO, 2006). Segundo Oliveira (2006), a importância desta informação é relacionada à estimativa da quantidade total de material que será processada em cada corrida de um determinado equipamento.

2.2.4.4.3 *Queda de pressão*

A perda de carga ou queda de pressão ao longo do jorro estável (ΔP) é um parâmetro fluidodinâmico de grande importância no estudo dos regimes de jorro e mede a queda de pressão que ocorre durante o funcionamento estável do leito (MATHUR; EPSTEIN, 1974; OLIVEIRA, 2006). Segundo Oliveira (2006), a estabilidade de um leito de jorro depende de suas dimensões e das propriedades das partículas utilizadas. Cunha (1999) apud Nascimento (2013) adiciona ainda que o comportamento da queda de pressão está relacionado às características da pasta, tais como seu comportamento reológico e tensão superficial.

Existe ainda um pico máximo de queda de pressão (ΔP_{max}), relacionado à queda de pressão que ocorre um pouco antes do jorro ser estabelecido e que pode ser atribuído à elevada demanda energética necessária para romper a estrutura do leito e estabelecer o regime de jorro. Esse valor é de grande importância para o projeto de sopradores de ar em uma unidade de leito de jorro (MATHUR; EPSTEIN, 1974; OLIVEIRA, 2006).

2.2.4.5 Requisitos para o jorro

A obtenção do jorro estável está relacionada a alguns fatores, tais como a velocidade do gás, a geometria do leito e propriedades das partículas inertes e do fluido:

- i) a velocidade do gás (v_{mj}) deve ser suficiente para vencer a resistência que o leito de partículas oferece;
- ii) cada equipamento tem uma altura máxima do leito de partículas (H_{max}) em que o jorro é estável, ultrapassando esta altura, o jorro não será alcançado;
- iii) o ângulo do cone facilita o fluxo das partículas da região anular para a região de jorro. O ângulo limite do cone depende do atrito interno das partículas, e para a maioria dos materiais o ângulo varia entre 40° e 60° ;
- iv) a relação entre o diâmetro da coluna (D_c) e o diâmetro do orifício (D_i) para uma determinada coluna influencia a altura máxima de jorro estável (H_{max}). Se o diâmetro da coluna for aumentado sem um correspondente aumento do diâmetro do orifício, a ação do jorro ficará confinada perto da base da coluna. Com dados de experimentos de vários materiais em uma coluna cone-cilíndrica, Becker (1961) apud Queiroz (1997) sugeriu a relação $\frac{D_i}{D_c} = 0,35$;
- v) o diâmetro mínimo da partícula recomendado para a utilização em um leito de jorro é cerca de 1 mm. Este tamanho de partícula está próximo do limite, no qual a efetividade do contato gás-sólido em leito fluidizado é seriamente prejudicada pela passagem do gás na forma de grandes bolhas (ADEODATO, 2003; QUEIROZ FILHO, 1997).

2.2.5 Secagem de microalgas - estado da arte

O crescente interesse na pesquisa e aplicação de diferentes espécies de microalga em diversos setores, juntamente com a importância do processo de secagem da biomassa visando sua conservação e estabilidade, tem motivado autores ao redor do mundo a estudarem este assunto. Na sequência, alguns trabalhos que envolvem esta temática serão brevemente apresentados.

Desmorieux e Decaen (2005) estudaram a influência da temperatura ($37-60^\circ\text{C}$) e da velocidade ($1,6-3,8 \text{ m s}^{-1}$) do ar na secagem

de *Spirulina*, utilizando um secador convectivo com circulação de ar quente. Neste trabalho, os autores ainda estabeleceram as isotermas de sorção para as temperaturas de 25 a 40°C, ajustando as curvas experimentais ao modelo de Henderson.

Lopes et al. (2006) avaliaram a secagem da biomassa da microalga *Aphanothece microscopica Nægeli* em leito de jorro. Através de um planejamento fatorial 2^3 , os autores estudaram a viabilidade técnica do processo, em função dos fatores: temperatura (80°C, 90°C), taxa de circulação acima da velocidade de jorro mínimo (60 %, 100 %) e vazão de alimentação (200 mL h⁻¹, 300 mL h⁻¹) e constataram que tais fatores influenciam significativamente na secagem da biomassa. A condição de secagem definida pelo planejamento experimental em relação aos parâmetros de qualidade refere-se à temperatura de 90°C, vazão de alimentação da biomassa de 200 mL h⁻¹ e taxa de circulação acima da velocidade de jorro mínimo de 100 %. O secador de leito de jorro demonstrou ser um equipamento adequado para a desidratação deste tipo de matéria-prima, visando à obtenção de um produto estável, sem o comprometimento das características de qualidade do produto final.

Oliveira (2006) analisou as condições operacionais de secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada e em leito de jorro avaliando a solubilidade em meio ácido e em meio aquoso e conteúdo de ficocianina. Para a primeira técnica, o autor utilizou um secador de funcionamento descontínuo com escoamento perpendicular de ar e os fatores de estudo foram a temperatura do ar e a carga de sólidos na bandeja, obtendo-se como resposta a solubilidade proteica em meio ácido. Com relação à técnica de leito de jorro, o autor utilizou secadores de geometria cônica e cone-cilíndrica, dos tipos CSB (*conventional spouted bed*) e JSB (*jet spouted bed*) e avaliou as alterações do produto final em relação à solubilidade proteica em meio aquoso.

Lopes et al. (2007) investigaram as características da cianobactéria *Aphanothece microscopica Nageli* em um secador convectivo, testando as temperaturas de ar de 40, 50 e 60°C e espessuras de amostras de 3, 5 e 7 mm. Nos testes, a velocidade do ar foi mantida estável e igual a 1,5 m s⁻¹, com fluxo paralelo. Os efeitos da temperatura do ar e espessura da amostra sobre as características de desidratação e parâmetros de qualidade do produto seco foram determinados, sendo que a espessura apresentou um efeito menos significativo na qualidade final do produto.

Oliveira et al. (2009) objetivaram em seu trabalho caracterizar a secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada, utilizando fluxo de

ar perpendicular. Os parâmetros variados foram a temperatura do ar (50 e 60°C) e a carga de material (4 e 6 kg m⁻²). Segundo os autores, a melhor região de trabalho foi de 60°C e 4 kg m⁻².

Dissa et al. (2010) investigaram os efeitos da secagem de *Spirulina* no que tange o encolhimento, porosidade e densidade de cilindros da biomassa. Os experimentos de secagem foram realizados em uma estufa de convecção natural, cuja temperatura manteve-se em 50°C e umidade relativa média de 12 %.

Viswanathan et al. (2012) investigaram o efeito de diferentes temperaturas do ar de secagem (30, 50, 70 e 90°C) nas características da biomassa seca, quando o produto foi submetido à secagem em um secador por convecção com fluxo de ar paralelo e com velocidade de ar igual a 0,25 m s⁻¹.

Brink e Marx (2013) investigaram a secagem ao sol, antecedida pela filtração arenosa. O tempo de exposição da microalga ao sol foi de 24 h, em uma espécie de placa construída com areia de área superficial de 0,0484 m². Segundo os autores, o recipiente construído de areia melhora a velocidade de secagem, uma vez que absorve a água da pasta de microalga inicialmente úmida.

Guldhe et al. (2014) estudaram diferentes técnicas (secagem ao sol, secagem na estufa e liofilização) para a secagem da microalga *Scenedesmus sp.* A secagem ao sol foi realizada à temperatura ambiente, durante 72 h. Para a liofilização, a biomassa úmida foi congelada durante uma noite toda a -84°C e liofilizada. Já a secagem na estufa ocorreu durante 12 horas em uma temperatura de 60°C. A secagem foi seguida pela extração de lípidios, com obtenção de produto com porcentagem de lípidios de 29,65 %, 28,63 % e 28,33 %, em peso de célula seca, respectivamente.

Bagchi, Rao e Mallick (2015) estudaram a secagem da microalga *Scenedesmus* em estufa, sob as temperaturas de 60, 80 e 100°C e com espessura inicial de amostra de 5, 7,5 e 10 mm. Os autores obtiveram a melhor condição de secagem a 80°C, com amostras de espessura de 5 mm e tempo de secagem de 15 h.

2.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A indústria de secagem ainda é fortemente baseada em estudos experimentais, no entanto, nas últimas décadas, a modelagem matemática e simulação de processos tem ganhado um importante espaço. O uso de métodos computacionais avançados para uma análise mais aprofundada dos fenômenos envolvidos na secagem tem o objetivo

de auxiliar na busca pelo aumento da qualidade do produto e na otimização das condições de secagem, reduzindo o tempo e o consumo de energia. Dentre os métodos aplicados, a dinâmica computacional de fluidos, do inglês “*computational fluid dynamics*” (CFD), ganha destaque (DEFRAEYE, 2014).

Os aspectos físicos do escoamento de qualquer fluido são fundamentalmente regidos pelos princípios de conservação da massa e da energia e pela segunda lei de Newton. Esses princípios podem ser expressos em termos de equações matemáticas, que, em sua forma mais geral, são equações diferenciais parciais (EDPs). O método CFD é, em parte, a arte de substituir as EDPs que regem o fluxo do fluido com números, e, com o avanço destes valores no espaço e no tempo, obter a descrição numérica do campo de fluxo de interesse (WENDT, 1992).

O papel do CFD na engenharia tornou-se tão forte que pode, atualmente, ser considerado uma nova 'terceira dimensão' em dinâmica de fluidos, sendo que as outras duas dimensões são os casos clássicos de teoria e experimental (WENDT, 1992). Segundo Sayma (2009), este ramo complementa a dinâmica de fluidos experimental e teórica, representando uma alternativa mais barata e que permite a análise de condições que não são possíveis ou que são extremamente difíceis de serem medidas experimentalmente.

A grande maioria, senão a totalidade dos softwares de CFD comerciais incluem interfaces de usuário sofisticadas, cujos códigos contêm três elementos principais: um pré-processador, um solucionador (*solver*) e um pós-processador.

A etapa inicial, ou pré-processamento, consiste na adição de informações a respeito do problema de escoamento que se deseja solucionar. As atividades do usuário nesta fase inicial incluem: definição da geometria (domínio computacional), geração da malha (subdivisão do domínio em pequenos subdomínios), seleção dos fenômenos físicos e químicos que precisam ser modelados, definição das propriedades dos materiais e especificação das condições de contorno apropriadas.

A solução do problema físico pode ocorrer por distintas técnicas de solução numérica, sendo que as usualmente praticadas são diferenças finitas, elementos finitos e métodos espectrais (VERSTEEG, H. K. MALALASEKERA, 2007).

A solução para um problema de escoamento é resolvida dentro de cada subdomínio. A precisão de uma solução CFD é regida pelo número de elementos da malha e pela qualidade dos mesmos. Em geral, quanto maior o número de elementos em uma malha, melhor será a precisão da

solução. Tanto a precisão de uma solução, quanto o custo computacional e o tempo de cálculo são diretamente dependentes do refinamento da malha (DEFRAEYE, 2014).

A etapa final, referente ao pós-processamento engloba a visualização e análise dos resultados. Os pacotes principais de CFD estão equipados com ferramentas de visualização de dados versáteis, que incluem desde gráficos 2D e 3D, até ferramentas de animação para exibição dos resultados de uma forma mais dinâmica (VERSTEEG, H. K. MALALASEKERA, 2007).

O uso e aceitação de métodos numéricos avançados por parte da comunidade científica engajada no estudo fenomenológico de secagem é limitada pelos fatores citados a seguir:

- i) a secagem envolve processos de transporte multifásico em múltiplas escalas, onde vários processos físicos estão envolvidos. A natureza deste processo é responsável pela complexidade e por parte dos desafios encontrados durante a modelagem do transporte no interior de materiais porosos, sendo este considerado um dos principais obstáculos na modelagem do processo de secagem;
- ii) modelagem numérica de desidratação de materiais porosos requer conhecimentos sobre as propriedades dos materiais, que são muitas vezes desconhecidas, mudam durante o processamento e apresentam uma complexa dependência com a temperatura e teor de umidade. A obtenção destes dados pode ser demorada e requer equipamento especializado, que é um dos principais obstáculos na aplicação de modelagem numérica para a secagem;
- iii) para os itens de baixo valor, como muitos alimentos, o esforço adicional empregado na modelagem do processo de secagem, muitas vezes não é economicamente justificado.

Contudo, algumas características observadas na modelagem numérica avançada contribuem para o melhor entendimento e otimização do processo de secagem:

- i) a simulação permite o monitoramento espacial e temporal bem amplo. Assim, a distribuição das variáveis (temperatura, teor de umidade) dentro do produto é possibilitada em alta resolução, mesmo em locais de difícil acesso experimental. Tal informação possibilita uma percepção física mais profunda e a compreensão do processo de secagem;

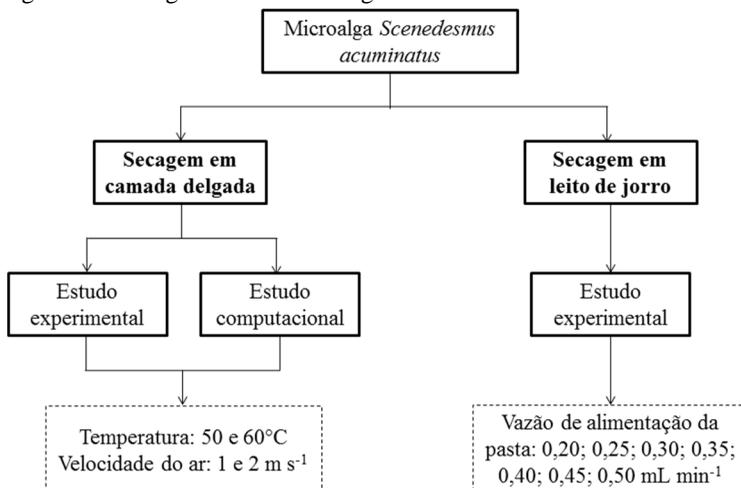
- ii) os fluxos de calor e de massa durante a secagem podem ser quantificados ao longo do tempo e do espaço, o que desempenha um papel fundamental na otimização de energia;
- iii) a capacidade de previsão inerente à modelagem permite testar a viabilidade de projetos e otimizar processos de secagem ou secadores, sem o custo e o esforço de construção e instalação em larga escala;
- iv) não há limitações com respeito às condições de secagem;
- v) modelagem não requer espaço laboratorial, nem tampouco manutenção ou equipe técnica para operar o equipamento e ainda evita os altos custos de energia, inerentes à secagem.

Essas características são responsáveis pelo grande impulso observado na pesquisa e uso de métodos computacionais na engenharia de processo de secagem nas últimas décadas (DEFRAEYE, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo trata da metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, cujo foco é a secagem da pasta de microalgas. Duas técnicas de secagem convectiva foram testadas, em camada delgada e em leito de jorro. No que se refere à primeira técnica de secagem, dois estudos foram realizados, um envolvendo a parte experimental, e o outro, a modelagem e simulação do processo. Os parâmetros investigados na secagem em camada delgada foram: temperatura de 50 e 60°C e velocidade do ar de secagem de 1 e 2 m s⁻¹. No âmbito da secagem em leito de jorro, realizou-se o desenvolvimento da unidade experimental, bem como testes envolvendo diferentes vazões de alimentação da pasta (0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40, 0,45, 0,50 mL min⁻¹). A metodologia envolvida neste trabalho está apresentada, de maneira resumida, na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia envolvida neste trabalho



Fonte: desenvolvido pelo autor

3.1 BIOMASSA DE MICROALGA

A pasta de microalga utilizada para a execução deste trabalho foi cedida pelo Laboratório de Cultivo de Algas (LCA-UFSC). Microalgas do gênero *Scenedesmus acuminatus* foram cultivadas em um sistema do tipo tanque circular aberto, com capacidade variando entre 3.000 e 5.000

L, operando em condições naturais de luminosidade e temperatura. A biomassa foi centrifugada em um equipamento Sharples S16, operando a 6.000 vezes a força gravitacional.

3.1.1 Caracterização da biomassa de microalga

A caracterização da biomassa de microalga foi feita a partir de análises de massa específica aparente ($\rho_{ap,pm}$), teor de umidade (X_0) e viscosidade aparente (μ_{pm}).

A massa específica aparente ($\rho_{ap,pm}$) pode ser entendida como a relação entre certa massa de pasta seca e o volume ocupado por esta quantidade de material. Nesta medida, os espaços vazios entre as partículas e os poros internos são considerados no volume total do material. A Equação 10 foi utilizada para o cálculo de $\rho_{ap,pm}$.

$$\rho_{ap,pm} = \frac{m_{pms}}{V} \quad (10)$$

Onde:

m_{pms} : massa de pasta de microalga seca (kg);

V: volume (m^3).

O teor de umidade inicial da pasta de microalga foi determinado em uma estufa, operando a temperatura de 70°C, durante 24 h, segundo metodologia proposta por Dissa et al. (2010).

A pasta de microalga utilizada nos experimentos de secagem em leito de jorro é resultado da diluição da pasta utilizada nos experimentos de secagem em camada delgada. A diluição foi necessária para facilitar o escoamento da pasta no sistema de alimentação.

A pasta de microalga foi caracterizada quanto à viscosidade aparente (μ_{pm}), em um viscosímetro rotacional clássico, *HAAKE Viscotester*. A sonda utilizada na análise foi a L4.

3.2 SECAGEM EM CAMADA DELGADA

A metodologia utilizada no desenvolvimento da secagem em camada delgada da pasta de microalga pode ser dividida em duas partes, uma referente ao estudo experimental e outra, à modelagem matemática e simulação.

3.2.1 Estudo experimental

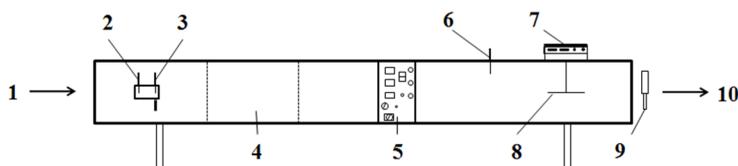
O estudo experimental está basicamente dividido em duas partes. Inicialmente, o equipamento utilizado na secagem da pasta de microalga é minuciosamente descrito. Na segunda parte, são apresentados os procedimentos e parâmetros empregados durante os experimentos.

3.2.1.1 Equipamento de secagem

Os experimentos envolvendo a secagem em camada delgada da pasta de microalga foram realizados em um secador convectivo do tipo túnel de vento, localizado no Laboratório de Operações Unitárias (LAB II-UFSC). Um desenho esquemático do secador utilizado é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Desenho esquemático do secador convectivo utilizado nos experimentos

(1) Entrada de ar; (2) e (3) termopares; (4) módulo de aquecimento; (5) painel elétrico; (6) termopar; (7) balança; (8) bandeja; (9) anemômetro digital; (10) saída de ar.



Fonte: desenvolvido pelo autor

O funcionamento do equipamento de secagem é detalhado na sequência. Um exaustor centrífugo (60 Hz) fornece o fluxo de ar desejado para o processo. A velocidade de fluxo de ar foi medida com um anemômetro (9) com uma precisão de $0,1 \text{ m s}^{-1}$. O aquecimento do ar foi realizado enquanto o ar fluía através de um conjunto de resistências elétricas (4). A temperatura de bulbo seco (2) e de bulbo úmido (3) do ar e a temperatura de ar de secagem (6) foram medidas por termopares Pt100. A pesagem foi realizada através de uma balança eletrônica (7) com precisão de $0,01 \text{ g}$. A pasta de microalga foi uniformemente distribuída sobre uma bandeja metálica (8), acoplada ao sistema de pesagem.

3.2.1.2 Procedimento experimental

Uma camada de aproximadamente 0,003 m de espessura da pasta foi colocada sobre uma bandeja metálica de diâmetro igual a 0,16 m. Na Figura 11 está apresentada uma imagem deste aparato com a pasta.

Figura 11 - Pasta de microalga



Fonte: desenvolvido pelo autor

As condições de secagem empregadas foram: temperatura de 50°C e 60°C e velocidade do ar de secagem de 1 m s⁻¹ e 2 m s⁻¹. Desse modo, quatro experimentos foram realizados para que todas as combinações entre os parâmetros fossem possíveis. Os parâmetros empregados em cada experimento estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros empregados nos experimentos de secagem em camada delgada

Experimento	Parâmetros	
	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m s ⁻¹)
1	50	1
2	50	2
3	60	1
4	60	2

Fonte: desenvolvido pelo autor

Nos primeiros 60 minutos do processo, a massa da pasta foi contabilizada em intervalos de 5 minutos. Após este tempo, foram realizadas anotações a cada 15 minutos.

A determinação da umidade do produto obtido em cada experimento foi realizada de maneira equivalente à determinação da umidade inicial da pasta, ou seja, deixou-se a amostra em estufa operando a 70°C, durante 24 h.

3.2.1.3 Análise dos dados

A velocidade de secagem (DR) da pasta de microalga foi calculada utilizando a Equação 11.

$$DR = \frac{\frac{(X_t - X_{t-dt})}{dt} + \frac{(X_{t+dt} - X_t)}{dt}}{2} \quad (11)$$

Onde:

X_t : umidade do tempo t (kg de água kg de material seco⁻¹);

X_{t-dt} : umidade do tempo t-dt (kg de água kg de material seco⁻¹);

X_{t+dt} : umidade do tempo t+dt (kg de água kg de material seco⁻¹).

O primeiro e o último conteúdo de umidade são calculados segundo a Equação 12.

$$DR = \frac{X_{t+dt} - X_t}{dt} \quad (12)$$

Onde:

X_{t+dt} : umidade do tempo t+dt (kg de água kg de material seco⁻¹);

X_t : umidade do tempo t (kg de água kg de material seco⁻¹);

O coeficiente de determinação (R^2) foi calculado a partir da Equação 13.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

Onde:

n: número de observações;

\hat{y}_i : massa de água na simulação (kg);

\bar{y} : média dos valores de massa de água observados experimentalmente (kg);

y_i : massa de água no experimento (kg).

3.2.1.4 Estimativa da difusividade efetiva

A Segunda Lei de Fick (Equação 14) para a difusão foi utilizada para ajustar os dados experimentais para a determinação do coeficiente de difusividade (D_{ef}).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 X \quad (14)$$

Onde:

X: teor de umidade (kg de água kg de material seco⁻¹);

t: tempo (s);

D_{ef} : difusividade efetiva (m² s⁻¹);

Considerando geometria de placa plana e supondo distribuição uniforme da umidade inicial, resistência externa desprezível, difusividade constante e encolhimento do material desprezível, a solução da Equação 14 pode ser integrada da forma apresentada na Equação 15.

$$X' = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (15)$$

Onde:

X': razão adimensional de umidade;

D_{ef} : difusividade efetiva (m² s⁻¹);

t: tempo (s);

L: espessura da amostra (m);

n_t : número inteiro positivo.

A razão adimensional de umidade é determinada através da Equação 16.

$$X' = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (16)$$

Onde:

X: umidade no tempo t (kg água kg de material seco⁻¹);

X_{eq} : umidade no equilíbrio (kg água kg de material seco⁻¹);

X_0 : umidade inicial (kg água kg de material seco⁻¹).

Os valores de umidade de equilíbrio são relativamente pequenos quando comparados a X e X_0 . Logo, a Equação 16 pode ser simplificada para a Equação 17.

$$X' = \frac{X}{X_0} \quad (17)$$

Quando a espessura da amostra é pequena e o tempo de secagem é relativamente longo, a Equação 17 pode ser simplificada e reescrita da forma como apresentado na Equação 18.

$$\ln X' = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - (K \cdot t) \quad (18)$$

Onde K é a constante de secagem ($m^2 s^{-1}$) e representa a inclinação da curva $\ln X'$ em função do tempo de secagem. O termo K relaciona-se com D_{ef} através da Equação 19 (DOYMAZ, 2009; GUPTA; COX; ABU-GHANNAM, 2011; OLIVEIRA et al., 2009; VELIĆ et al., 2004).

$$K = \frac{D_{ef} \pi^2}{4L^2} \quad (19)$$

Onde:

Def: difusividade efetiva ($m^2 s^{-1}$);

L: espessura da amostra (m);

3.2.2 Estudo computacional

A modelagem matemática e simulação da secagem em camada delgada da pasta de microalga foram realizadas com o objetivo de prever os fenômenos presentes durante a simultânea transferência de calor e de massa que ocorre ao longo deste processo. Os modelos matemáticos tem o potencial de determinar a influência de parâmetros de processo no comportamento da secagem, podendo representar uma excelente ferramenta na tentativa de minimizar os custos do processo, bem como impedir a perda de qualidade do produto, que pode ocorrer com a secagem excessiva do mesmo (PERUSSELLO et al., 2014). Para

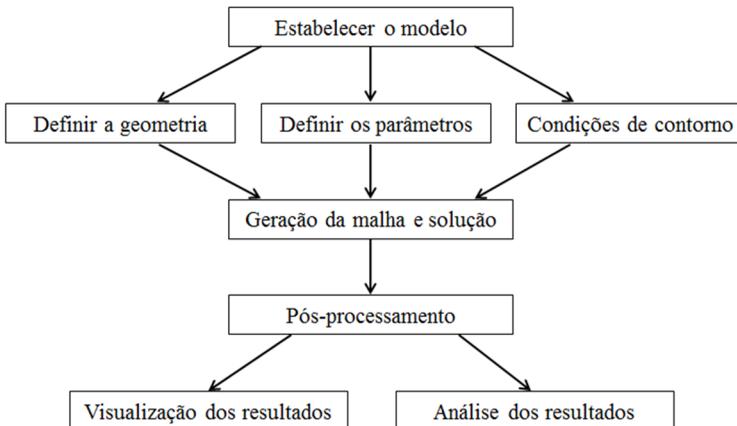
este modelo, utilizou-se o software *COMSOL Multiphysics*, que resolve as equações diferenciais parciais (EDPs) através do método dos elementos finitos. Os módulos utilizados para a representação da transferência de calor e de massa foram, respectivamente, *Heat transfer in porous media* e *Species transport in porous media*.

3.2.2.1 O COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics é um software que se baseia em métodos numéricos avançados para modelar e simular problemas envolvendo uma ampla gama de fenômenos físicos (COMSOL, 2015; WANG et al., 2011).

Este software inclui três seções: pré-processo, solução e pós-processo. A primeira seção engloba a criação do modelo de elementos finitos e definição de parâmetros. A criação da malha e resolução de equações pertencem à seção de solução. Já a visualização e análise dos resultados referem-se ao pós-processamento (WANG et al., 2011). Na Figura 12 é apresentado um esquema das etapas básicas necessárias para a criação de um aplicativo no *COMSOL Multiphysics*.

Figura 12 - Etapas básicas para a criação de um aplicativo no *COMSOL Multiphysics*



Fonte: adaptado de Wang et al. (2011)

O *COMSOL Multiphysics* utiliza, na grande maioria dos módulos, o método dos elementos finitos para montar e resolver modelos (COMSOL, 2015).

3.2.2.2 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica numérica utilizada na resolução de EDPs (DHATT; TOUZOT; LEFRANÇOIS, 2012; HUTTON, 2004; SAYMA, 2009). O MEF consiste na divisão do domínio em células, chamadas de elementos, que juntos formam uma malha. Para cada um destes elementos, uma solução aproximada para a EDP pode ser obtida. A solução total é gerada vinculando as soluções individuais e, ao mesmo tempo, garantindo a continuidade nas fronteiras entre os elementos (CHAPRA; CANALE, 2007; SAYMA, 2009; WENDT, 1992).

No MEF, os elementos possuem diferentes formas e podem ser retilíneos ou curvos. Além disso, a malha não precisa ser estruturada. As características anteriormente citadas permitem a criação de malhas irregulares, que possuem maior capacidade de adaptação a geometrias complexas, sendo esta a principal vantagem deste método (CHAPRA; CANALE, 2007; DICKINSON; EKSTRÖM; FONTES, 2014; SAYMA, 2009; WENDT, 1992).

O MEF, assim como os demais métodos numéricos discretos utilizados para a resolução de EDPs contínuas, introduz erro numérico. Este erro pode ser minimizado através do refinamento da malha, o que afeta diretamente na definição dos resultados. Quanto menores os elementos, menores os erros de discretização, mas maiores os tempos de geração da malha e solução. Outra alternativa é o refino de malha local, em regiões onde gradientes de fluxo (fluxo difusivo, por exemplo) mudam rapidamente (DICKINSON; EKSTRÖM; FONTES, 2014).

A implementação do MEF segue um procedimento geral, embora algumas particularidades variem conforme o modelo.

O primeiro passo é a discretização do domínio de solução em elementos finitos. O MEF permite uma variedade de formas de elementos, por exemplo, triângulos e quadriláteros em duas dimensões e tetraedros, hexaedros, pentaedros e prismas no plano tridimensional (WENDT, 1992). Na Figura 13 são apresentados exemplos de elementos empregados em uma, duas e três dimensões.

O segundo passo do método consiste em aproximar a solução do problema por funções de interpolação em cada elemento. Este passo é composto por duas etapas. Inicialmente, deve-se escolher a função apropriada, com coeficientes desconhecidos, que aproximará a solução. A segunda etapa consiste no desenvolvimento da equação que rege o comportamento do elemento. Os coeficientes são avaliados de modo que a função se aproxime da solução ótima. Para isso, métodos numéricos

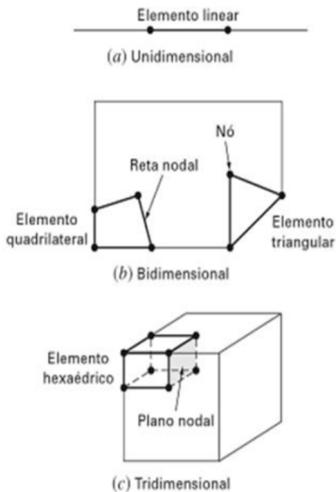
são utilizados, estando o método direto, o método de resíduos ponderados e o método variacional entre os mais comumente utilizados.

O passo seguinte corresponde à montagem, no qual o conjunto de equações algébricas obtidas para cada elemento é acoplado a fim de caracterizar o comportamento de todo o sistema. Este processo é governado pelo conceito de continuidade. Tal conceito implica que as soluções para elementos contínuos são combinadas, de modo que os valores desconhecidos nos nodos em comum são equivalentes. Assim, a solução total é contínua (CHAPRA; CANALE, 2007).

Em seguida, as condições de contorno do problema são aplicadas e a solução do sistema de equações pode ser obtida com técnicas de resolução de sistemas algébricos.

A etapa final do MEF é o pós-processamento, comentado no item anterior. Nesta etapa, as soluções obtidas são expressas por meio de tabelas e gráficos ou ainda variáveis secundárias são determinadas, obtendo-se valores médios, derivadas ou integrais (SANTOS, 2013).

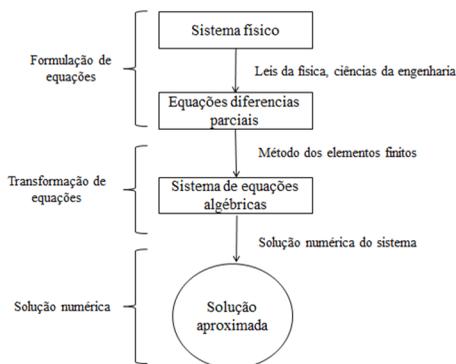
Figura 13 - Elementos finitos usados em (a) uma dimensão; (b) duas dimensões e (c) três dimensões



Fonte: adaptado de Chapra e Canale, 2007

Um diagrama que descreve a sequência de resolução de um problema físico, utilizando o MEF é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Diagrama da sequência de resolução de um problema no físico

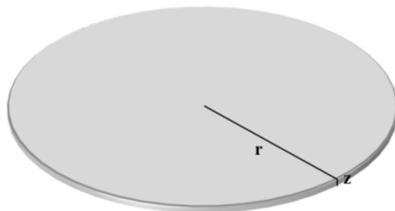


Fonte: adaptado de Dhatt, Touzot e Lefrançois, 2012

3.2.2.3 Desenvolvimento do modelo

Um modelo em duas dimensões (2D) axissimétrico foi desenvolvido para descrever os fenômenos envolvidos na secagem em camada delgada da pasta de microalga. Na Figura 15 é apresentado o domínio computacional do problema em questão, em 3D.

Figura 15 - Domínio computacional



Fonte: desenvolvido pelo autor

As dimensões da geometria apresentada na Figura 15 equivalem às dimensões reais consideradas na validação experimental, onde r representa o raio e é igual a 0,08 m e z representa a espessura de pasta utilizada, com valor de 0,003 m.

3.2.2.4 Modelagem fenomenológica

As hipóteses básicas adotadas para a modelagem do processo de secagem em camada delgada da pasta de microalga foram:

- i. o efeito de encolhimento da biomassa devido à secagem não foi considerado;
- ii. assumiu-se a existência de um fluido inerte de suporte como uma maneira de adaptar para o estudo os modelos de transferência de calor e massa em meio poroso que tratam a umidade como um soluto. Esta hipótese foi anteriormente assumida por SANTOS (2013), que afirma que o fluido suporte é uma fase fluida virtual que transporta a umidade dentro do sólido. De acordo com o autor, as propriedades físicas do fluido suporte variam linearmente com a umidade entre dois extremos: o meio poroso saturado com água e o meio poroso totalmente seco. Na última situação, os espaços vazios estariam preenchidos com ar;
- iii. não há movimento do fluido suporte relativo às células do meio poroso, de forma que o termo de dispersão na equação de massa é nulo;
- iv. não há geração ou consumo de umidade no meio poroso;
- v. o fluxo do ar de secagem em contato com a biomassa é uniforme e continuamente renovado. Desta forma, as condições de umidade e temperatura do ar não se alteram devido à troca de calor e massa com a pasta;
- vi. o fluido suporte satura o meio poroso;
- vii. o secador foi assumido como adiabático e qualquer escopo de radiação foi assumida como negligenciável;
- viii. a transferência de massa no interior da pasta de microalga ocorre apenas por difusão;
- ix. a evaporação ocorre apenas na superfície;
- x. a transferência de calor é feita por condução no interior do produto, e por convecção do lado de fora do produto.

A fenomenologia envolvida na secagem da pasta de microalga é representada pelos modelos de transferência de calor e de massa. A transferência de calor em meios porosos é usada para especificar as propriedades térmicas da matriz porosa. A transferência de massa em meios porosos é modelada através da física de transporte de espécies em meio poroso.

3.2.2.4.1 Transferência de calor em meio poroso

O modelo utiliza a Equação 20 para modelar o fenômeno de transferência de calor em uma matriz porosa.

$$(\rho C_P)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{fs} C_{P,fs} \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\kappa_{ef} \nabla T) + Q \quad (20)$$

Onde:

ρ : massa específica do fluido (kg m^{-3});

C_P : capacidade calorífica do fluido ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

$\frac{\partial T}{\partial t}$: derivada da temperatura em relação ao tempo (K s^{-1});

ρ_{fs} : massa específica do fluido suporte (kg m^{-3});

$C_{P,fs}$: capacidade calorífica do fluido suporte a pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

\mathbf{u} : campo de velocidade (m s^{-1});

∇T : gradiente de temperatura (K);

κ_{ef} : condutividade térmica efetiva ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

Q : fonte de calor (J kg^{-1}).

O primeiro termo que antecede a igualdade na Equação 20 $(\rho C_P)_{ef}$, é chamado de capacidade calorífica volumétrica efetiva, dado em $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ e determinado através da Equação 21. A condutividade térmica efetiva, dada em $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ e simbolizada acima por κ_{ef} , é dada pela Equação 22. Estes dois termos relacionam-se às propriedades do meio poroso e do fluido suporte (COMSOL, 2015).

$$(\rho C_P)_{ef} = (1-\theta)\rho_p C_{P,p} + \theta\rho_{fs} C_{P,fs} \quad (21)$$

Onde:

θ : fração de volume da fase fluida;

ρ_p : massa específica do meio poroso (kg m^{-3});

$C_{P,p}$: capacidade calorífica do meio poroso ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

ρ_{fs} : massa específica do fluido suporte (kg m^{-3});

$C_{P,fs}$: capacidade calorífica do fluido suporte ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

$$\kappa_{ef} = (1-\theta)\kappa_p + \theta\kappa_{fs} \quad (22)$$

Onde:

θ : fração de volume da fase fluida;

κ_p : condutividade térmica do meio poroso ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

κ_{fs} : condutividade térmica do fluido suporte ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

Os termos κ_{fs} , ρ_{fs} e $C_{P,fs}$ são dados pelas Equações 23, 24 e 25, respectivamente (SANTOS, 2013).

$$\kappa_{fs} = \kappa_A - (\kappa_A - \kappa_{ar}) \frac{c_{A,0} - c_A}{c_{A,0}} \quad (23)$$

$$\rho_{fs} = \rho_A - (\rho_A - \rho_{ar}) \frac{c_{A,0} - c_A}{c_{A,0}} \quad (24)$$

$$C_{P,fs} = C_{P,A} - (C_{P,A} - C_{P,ar}) \frac{c_{A,0} - c_A}{c_{A,0}} \quad (25)$$

Onde:

κ_A : condutividade térmica da água ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

κ_{ar} : condutividade térmica do ar ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

$c_{A,0}$: concentração inicial de água na pasta de microalga (mol m^{-3});

c_A : concentração da água no fluido suporte (mol m^{-3});

ρ_A : massa específica da água (kg m^{-3});

ρ_{ar} : massa específica do ar (kg m^{-3});

$C_{P,A}$: capacidade calorífica da água ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

$C_{P,ar}$: capacidade calorífica do ar ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

No interior do meio poroso, considerou-se $u=0$. O termo que engloba a geração de calor (Q) é nulo para o modelo proposto. A parcela de calor associada à mudança de fase da água é incluída como uma condição de contorno. Assim, a equação do modelo de transferência de calor na microalga durante a secagem é descrita pela Equação 26 (COMSOL, 2015).

$$(\rho C_P)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa_{ef} \nabla T) \quad (26)$$

a) Condição inicial

Inicialmente, a pasta de microalga está submetida à temperatura ambiente (T_{amb}), conforme condição inicial 26-a.

$$T = T_{amb}, \text{ para } t = 0 \text{ e } \begin{cases} 0 \leq r \leq 0,08 \text{ m} \\ 0 \leq z \leq 0,003 \text{ m} \end{cases} \quad (26-a)$$

b) Condições de contorno

O aquecimento do meio poroso por meio da convecção devido ao escoamento do ar e a consequente evaporação da água contida na pasta são contabilizados pelas condições de contorno 26-b e 26-c, respectivamente. Todas as fronteiras estão submetidas à transferência de calor por convecção, sendo que a resistência oferecida pela bandeja metálica foi considerada desprezível (COMSOL, 2015).

$$-n \cdot (-\kappa_{fs} \nabla T) = h(T_{ar} - T_{pm}), \text{ para } t \geq 0 \quad (26-b)$$

Onde:

n : normal à fronteira apontando para fora do domínio;

κ_{fs} : condutividade térmica do fluido suporte ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

h : coeficiente convectivo de transferência de calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$);

T_{ar} : temperatura do ar (K);

T_{pm} : temperatura da pasta de microalga (K).

$$-n \cdot (-\kappa_{fs} \nabla T) = Q_b \quad (26-c)$$

Onde:

n : normal à fronteira apontando para fora do domínio;

κ_{fs} : condutividade térmica do fluido suporte ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

Q_b : fluxo convectivo de calor ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

O termo Q_b pode ser estimado através da Equação 27.

$$Q_b = M_A Q_{st} k_c (c_{A\infty} - c_{As}) \quad (27)$$

Onde:

M_A : massa molar da água (kg mol^{-1});

Q_{st} : calor isostérico integral (J kg^{-1});

k_c : coeficiente convectivo de transferência de massa (m s^{-1});

$c_{A\infty}$: concentração de água no ar de secagem (mol m^{-3});

c_{As} : concentração de água na camada de ar em contato com a superfície do domínio (mol m^{-3}).

O termo Q_{st} , nomeado acima como calor isostérico integral, representa um parâmetro que estima a quantidade mínima de calor requerida para remover uma quantidade de água adsorvida na fase sólida. Para o caso em estudo, considerou-se que Q_{st} é igual ao calor de

vaporização da água pura (ΔH_{vap}), calculado em J kg^{-1} através da Equação 28 (POLING; PRAUSNITZ; O'CONNEL, 2001).

$$Q_{\text{st}} = \Delta H_{\text{vap}} = -4,35T_{\text{pm}}^2 + 452,05T_{\text{pm}} + 2,69 \times 10^6 \quad (28)$$

Onde:

T_{pm} : temperatura da pasta de microalga (K).

3.2.2.4.2 *Transferência de massa em meio poroso*

A equação geral para o transporte de massa em meio poroso é apresentada da forma como segue a Equação 29.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta c_A) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\text{ap,pm}} c_{\text{P,A}}) + \frac{\partial}{\partial t}(a_v c_{\text{G,A}}) + \mathbf{u} \cdot \nabla c_A = \nabla \cdot [(D_D + D_{\text{ef}}) \nabla c_A] + R_A + S_A \quad (29)$$

Onde:

c_A : concentração de água no fluido suporte (mol m^{-3});

θ : fração de volume da fase fluida;

$\rho_{\text{ap,pm}}$: massa específica aparente da pasta de microalga (kg m^{-3});

$c_{\text{P,A}}$: quantidade de água adsorvida na pasta de microalga ($\text{mol de água kg}^{-1}$ de microalga seca);

a_v : fração de volume da fase gasosa;

$c_{\text{G,A}}$: concentração de vapor d'água na fase gasosa ($\text{mol de água m}^{-3}$ de ar seco);

\mathbf{u} : campo de velocidade da fase fluida (m s^{-1}).

D_D : tensor de dispersão ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

D_{ef} : difusividade efetiva da umidade no fluido suporte ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

R_A : taxa de reação ($\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$);

S_A : termo de fonte ($\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$).

Na Equação 29, os três primeiros termos que antecedem a igualdade referem-se, respectivamente, ao acúmulo de massa da espécie química nas fases líquida, sólida e gasosa. O quarto termo descreve o fenômeno de convecção. No caso em estudo, este termo é nulo, pois a convecção é considerada em uma condição de contorno.

A adsorção/dessorção da água pelas células da microalga é expressa como uma função da umidade relativa do ar de secagem, chamada de isoterma de sorção. A isoterma foi considerada na condição

de contorno que contabiliza o fluxo de saída de água para o meio de secagem. No interior do meio poroso, considerou-se que $c_{P,A}=0$.

O primeiro termo do lado direito da Equação 29 descreve o transporte de espécies devido a mistura mecânica (dispersão), bem como a partir da difusão da espécie. De acordo com a suposição (iii), o tensor de dispersão (D_D) foi considerado desprezível.

Os últimos dois termos do lado direito da Equação 29 descrevem a geração ou consumo da umidade, devido a reações químicas (R_A) ou a presença de fontes externas (S_A). De acordo com as hipóteses assumidas, ambos os termos são nulos.

Dessa forma, a equação do modelo de transferência de massa na pasta de microalga durante a secagem resume-se à Equação 30 (COMSOL, 2015).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta c_A) = \nabla \cdot D_{ef} \nabla c_A \quad (30)$$

a) Condição inicial

A pasta de microalga está inicialmente submetida a uma umidade de 73 % em base úmida, conforme condição inicial 30-a.

$$c_A = c_{A,0}, \text{ para } t = 0 \text{ e } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq r \leq 0,08 \text{ m} \\ 0 \leq z \leq 0,003 \text{ m} \end{array} \right. \quad (30-a)$$

A concentração inicial da água na pasta de microalga ($c_{A,0}$) utilizada nas simulações foi calculada a partir dos dados obtidos experimentalmente.

b) Condições de contorno

Para a simulação, considerou-se que não há fluxo de entrada ou saída de umidade na borda inferior do domínio considerado, conforme demonstrado na condição de contorno 30-b.

$$-n \cdot N_A = 0, \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} 0 \leq r \leq 0,08 \text{ m} \\ z = 0 \text{ m} \end{cases} \quad (30-b)$$

O fluxo de água evaporada da pasta de microalga (N_A) é contabilizado na condição de fronteira 30-c, apresentada abaixo.

$$-n \cdot N_A = k_c (c_{A,\infty} - c_{A,s}), \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} 0 \leq r \leq 0,08 \text{ m} \\ z = 0,003 \text{ m} \\ r = 0,08 \text{ m} \\ 0 \leq z \leq 0,003 \end{cases} \quad (30-c)$$

Onde:

N_A : fluxo molar de água evaporada da pasta de microalga ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

n : normal à fronteira apontando para fora do domínio;

k_c : coeficiente convectivo de transferência de massa (m s^{-1});

$c_{A,\infty}$: concentração de água no ar de secagem (mol m^{-3});

$c_{A,s}$: concentração de água na camada de ar em contato com a superfície do domínio (mol m^{-3}).

N_A representa o fluxo total de água que sai da pasta de microalga. Segundo a hipótese viii, a transferência de massa no interior da pasta de microalga ocorre apenas por difusão. Assim, N_A é determinado pela Equação 31 (COMSOL, 2015).

$$N_A = D_{\text{ef}} \nabla c_A \quad (31)$$

Onde:

D_{ef} : coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$);

c_A : concentração de água no fluido suporte (mol m^{-3}).

O termo $c_{A,s}$, por sua vez, é calculado de acordo com a Equação

32.

$$c_{A,s} = \frac{UR}{RT_{\text{pm}}} \times P_{\text{sat,ar}} \quad (32)$$

Onde:

UR: umidade relativa do ar de secagem;

R: constante universal dos gases ideais ($\text{Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

T_{pm} : temperatura da pasta de microalga (K);

$P_{\text{sat,ar}}$: pressão de vapor saturado do ar (Pa).

A conversão da umidade relativa do ar para unidades de concentração (mol m^{-3}) fica em função da umidade do material poroso, que é dado pelo modelo de isoterma.

A pressão de vapor saturado do ar ($P_{\text{sat,ar}}$), por sua vez, foi determinada através de uma relação com a temperatura da pasta de microalga (K), apresentada na Equação 33 (TETENS, 1930 apud SANTOS, 2013).

$$P_{\text{sat,ar}} = 610,8 \exp\left(\frac{17,3T_{\text{pm}} - 4725,5}{T_{\text{pm}} - 35,85}\right) \quad (33)$$

3.2.2.5 Parâmetros do modelo

Os parâmetros do modelo, apresentados na sequência, foram determinados para cada um dos 4 casos estudados.

3.2.2.5.1 Equações psicrométricas

As equações psicrométricas interagem com as propriedades termodinâmicas do ar úmido e utilizam essas propriedades para analisar as condições e processos que o envolvem (ASHRAE, 2009). O cálculo das propriedades do ar utilizado no processo de secagem foi realizado por meio de equações psicrométricas obtidas em Ashrae (2009).

As equações a seguir foram aplicadas para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar ambiente. A pressão de saturação do vapor de água ($P_{\text{sat,va}}$) é utilizada para determinar algumas propriedades do ar úmido e é calculada como uma função da temperatura de bulbo seco (T_{bs}), em K, através da Equação 34.

$$\ln P_{\text{sat,va}} = -\frac{5800,22}{T_{\text{bs}}} + 1,39 - 4,86 \times 10^{-2} T_{\text{bs}} + 4,18 \times 10^{-5} T_{\text{bs}}^2 - 1,44 \times 10^{-8} T_{\text{bs}}^3 + 6,55 \ln T_{\text{bs}} \quad (34)$$

A umidade absoluta do ar (UA_{amb}) (Equação 35), em kg de H_2O kg^{-1} de ar seco, foi determinada em função da pressão de saturação,

calculada através da Equação 34, e umidade relativa do ar, determinada através de cartas psicrométricas. Os valores de T_{bs} e da T_{bu} utilizados foram obtidos a partir dos casos estudados experimentalmente.

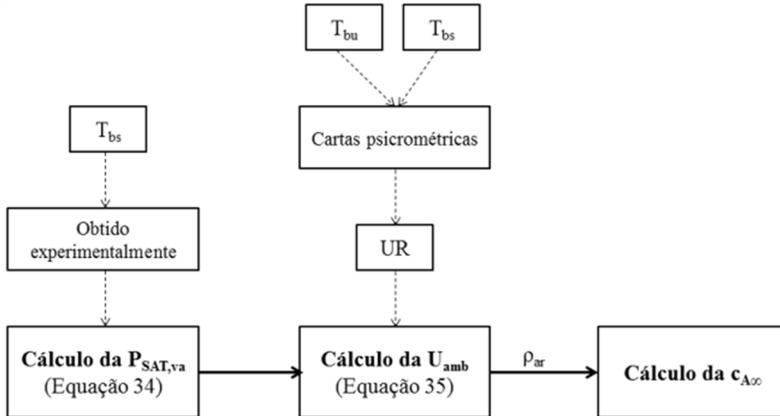
$$UA_{amb} = \frac{0,622 \times \left(\frac{UR}{100}\right) \times P_{sat,va}}{P_{atm} - \left(\frac{UR}{100}\right) \times P_{sat,va}} \quad (35)$$

3.2.2.6 Propriedades dos materiais

3.2.2.6.1 Condições do ar

As condições do ar foram obtidas por meio das equações psicrométricas apresentadas no tópico de modelagem fenomenológica. O fluxograma apresentado na Figura 16 relembra como as propriedades foram calculadas.

Figura 16 - Fluxograma do procedimento adotado para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar



Fonte: elaborada pelo autor

A Tabela 4 apresenta os valores calculados para as propriedades do ar em cada um dos casos, bem como os valores de T_{bs} e T_{bu} , obtidos experimentalmente.

Tabela 4 - Condições do ar ambiente

Parâmetros	T _{bs} (K)	T _{bu} (K)	P _{sat} (Pa)	UR (%)	U _{A_{amb}} (kg de H ₂ O kg ⁻¹ de ar seco)	c _{A∞} (mol de H ₂ O m ⁻³ de ar seco)
50°C e 1 m s ⁻¹	293,45	290,25	2473,85	76	0,0117	0,7827
50°C e 2 m s ⁻¹	292,05	288,15	2267,46	67	0,009468	0,6322
60°C e 1 m s ⁻¹	295,35	292,75	2780,16	78	0,0136	0,8963
60°C e 2 m s ⁻¹	294,65	290,65	2663,81	70	0,01166	0,6821

Fonte: elaborado pelo autor

3.2.2.6.2 Determinação do equilíbrio higroscópico entre a pasta de microalga e o ar de secagem

A relação de equilíbrio entre a umidade relativa do ar (UR) e a umidade da pasta de microalga (X_{eq}) foi obtida ajustando o modelo de isoterma aos dados experimentais de Desmorieux & Decaen (2005), através do *software Wolfram Mathematica*[®]. Estes dados referem-se à secagem convectiva da microalga da espécie *Spirulina*, a temperatura de 40°C, e estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Umidade de equilíbrio de microalga em função do coeficiente de atividade da água

Atividade da água	Umidade no material (kg de água kg de material seco ⁻¹)
0,01	0,02
0,18	0,035
0,37	0,08
0,58	0,15
0,89	0,57

Fonte: Desmorieux & Decaen, 2005

O modelo de Henderson, apresentado na Equação 36, foi o escolhido para o ajuste dos dados (HASSINI et al., 2015). Segundo Mulet (2002), este modelo está entre os mais comumente utilizados por descrever bem o comportamento de diversos materiais higroscópicos, tais como produtos alimentares e agrícolas.

$$1 - a_w = \exp\left[-m \times X_{eq}^n\right] \quad (36)$$

Onde:

a_w : atividade de água;

m, n : constantes características do material;

X_{eq} : umidade de equilíbrio (kg de água kg de material seco⁻¹).

3.2.2.6.3 Coeficiente convectivo de transferência de massa

O coeficiente convectivo de transferência de massa foi determinado através da Equação 4, apresentada no capítulo referente à revisão bibliográfica. Para tal estimativa, considerou-se a superfície da pasta na condição de saturação.

A concentração de água na interface sólido-meio de secagem (c_{As}) foi determinada através de cartas psicrométricas. A concentração de água no ar de secagem ($c_{A\infty}$) foi calculada no item anterior. O fluxo molar de água evaporada (N_A), por sua vez, foi determinado através da Equação 37 (PARK et al., 2007).

$$N_A = \frac{\partial X}{\partial t} \times M_A \quad (37)$$

Onde:

$\frac{\partial X}{\partial t}$: derivada do conteúdo de umidade em relação ao tempo (kg de água min⁻¹);

A_s : área superficial (m²);

M_A : massa molar de água (kg mol⁻¹).

O valor de $\frac{\partial X}{\partial t}$ foi obtido através da curva que relaciona a velocidade de secagem de microalgas com o conteúdo de umidade (Figura 4), considerando os dados coletados no estudo experimental. Escolheu-se o valor referente ao maior valor da taxa de água evaporada.

A Tabela 6 resume os parâmetros determinados para cada caso estudado, bem como o valor do coeficiente convectivo, calculado através da Equação 4.

Tabela 6 - Parâmetros e coeficiente convectivo

Parâmetros	c_{As} (mol m^{-3})	$c_{A\infty}$ (mol m^{-3})	N_A ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	k_c (m s^{-1})
50°C e 1 m s^{-1}	0,86	0,7827	0,019	0,2458
50°C e 2 m s^{-1}	0,86	0,6322	0,033	0,1448
60°C e 1 m s^{-1}	1,0318	0,8963	0,021	0,1588
60°C e 2 m s^{-1}	1,0318	0,6821	0,037	0,1058

Fonte: o autor

3.2.2.6.4 Propriedades termo-físicas da microalga e do fluido suporte

A solução das EDPs apresentadas no tópico de modelagem matemática requer o conhecimento de propriedades termo-físicas e de transporte do produto e do ar. As propriedades termo-físicas do produto (por exemplo, condutividade térmica, capacidade calorífica e massa específica) são assumidas como dependentes de sua composição (por exemplo, água, proteína, lipídios, carboidratos, cinzas) e expressas como uma função da temperatura (APRAJEETA; GOPIRAJAH; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2015; SABAREZ, 2012).

Choi e Okos desenvolveram, em 1986, modelos matemáticos capazes de determinar as propriedades térmicas dos principais componentes presentes nos alimentos (água, proteína, lipídio, carboidrato, cinza) em função da sua temperatura. Estas equações estão apresentadas nas Tabelas 7, 8 e 9, e são válidas para temperaturas entre 0 e 150°C (RAO et al., 2014). Dessa forma, uma vez conhecida a composição do material, torna-se possível estimar suas propriedades termo-físicas, da forma como segue abaixo.

A massa específica do meio poroso (ρ_p) foi determinada segundo a relação proposta por Choi e Okos (1986) apud RAO et al. (2014), que desenvolveram uma expressão para determinar a massa específica de alimentos segundo a sua composição bioquímica (Equação 38).

$$\frac{1}{\rho_p} = \sum \frac{x_i}{\rho_i} \quad (38)$$

Onde:

ρ_p : massa específica do meio poroso (kg m^{-3});

x_i : fração mássica dos componentes;

ρ_i : massa específica dos componentes (kg m^{-3}).

A massa específica de cada componente, por sua vez, pode ser determinada segundo as relações apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Expressões para a determinação da massa específica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura

Componente	ρ (kg m⁻³)
Água	$997,18 + 3,1439 \times 10^{-3}T - 3,7574 \times 10^{-3}T^2$
Proteína	$13299 - 5,1840 \times 10^{-1}T$
Lipídio	$925,59 - 4,1757 \times 10^{-1}T$
Carboidrato	$1599,1 - 3,6589 \times 10^{-1}T$
Cinza	$24238 - 2,8063 \times 10^{-1}T$

Fonte: Choi e Okos, 1986 apud RAO et al., 2014

A capacidade calorífica do meio poroso pode ser calculada segundo a Equação 39 (CHOI e OKOS, 1986 apud RAO et al., 2014).

$$C_{P,p} = \sum x_i C_{P_i} \quad (39)$$

Onde:

$C_{P,p}$: capacidade calorífica do meio poroso (J kg⁻¹ °C⁻¹);

x_i : fração mássica dos componentes;

C_{P_i} : capacidade calorífica dos componentes (J kg⁻¹ °C⁻¹).

A capacidade calorífica dos componentes em questão pode ser calculada através das equações empíricas apresentadas na Tabela 8 (CHOI e OKOS, 1986 apud RAO et al., 2014).

O cálculo da condutividade térmica foi feito com base na Equação 40 (CHOI e OKOS, 1986 apud RAO et al., 2014).

$$\kappa_p = \sum x_i \kappa_i \quad (40)$$

Onde:

κ_p : condutividade térmica do meio poroso (W m⁻¹ °C⁻¹);

x_i : fração mássica dos componentes;

κ_i : condutividade térmica dos componentes (W m⁻¹ °C⁻¹).

Tabela 8 - Expressões para a determinação da capacidade calorífica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura

Componente	C_p ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
Água	$4176,2 - 0,0909T + 5,4731 \times 10^{-3}T^2$
Proteína	$2008,2 + 1,2089T - 1,3129 \times 10^{-3}T^2$
Lipídio	$1984,2 + 1,4373T - 4,8008 \times 10^{-3}T^2$
Carboidrato	$1548,8 + 1,9625T - 5,9399 \times 10^{-3}T^2$
Cinza	$1092,6 + 1,8896T - 3,6817 \times 10^{-3}T^2$

Fonte: Choi e Okos, 1986 apud RAO et al., 2014

Choi e Okos (1986) apud RAO et al. (2014) indicam as equações apresentadas na Tabela 9 para estimar a condutividade térmica dos componentes em questão.

Tabela 9 - Expressões para a determinação da condutividade térmica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura

Componente	κ ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
Água	$0,57109 + 1,762 \times 10^{-3}T - 6,7036 \times 10^{-6}T^2$
Proteína	$0,17881 + 1,1958 \times 10^{-3}T - 2,7178 \times 10^{-6}T^2$
Lipídio	$0,18071 - 2,7604 \times 10^{-3}T - 1,7749 \times 10^{-7}T^2$
Carboidrato	$0,20141 + 1,3874 \times 10^{-3}T - 4,3312 \times 10^{-6}T^2$
Cinza	$0,32961 + 1,4011 \times 10^{-3}T - 2,9069 \times 10^{-6}T^2$

Fonte: Choi e Okos, 1986 apud RAO et al., 2014

A composição bioquímica da microalga considerada para o cálculo das propriedades termo físicas foi obtida de Mostafa (2012) e Richmond (2004). Os autores determinaram o conteúdo de proteínas, carboidratos e lipídios da espécie de microalga *Scenedesmus obliquus*, em base seca. A fim de completar a composição centesimal, assumiu-se que os 13 % restantes são constituídos por cinzas (Tabela 10).

Desta forma, através de uma média ponderada entre as propriedades termo-física de cada componente, determinou-se a massa específica, a capacidade calorífica e a condutividade térmica da pasta de microalga utilizada.

A porosidade da pasta de microalga (ϵ_{pm}) foi determinada conforme a Equação 41 (KROKIDA; MAROULIS, 1997).

Tabela 10 - Constituição da microalga considerada nas simulações

Constituinte	Porcentagem
Proteínas	56 %
Carboidratos	17 %
Lipídios	14 %
Cinza	13 %

Fonte: Mostafa (2012); Richmond (2004)

$$\epsilon_{pm} = 1 - \frac{\rho_{ap,pm}}{\rho_p} \quad (41)$$

Onde:

$\rho_{ap,pm}$: massa específica aparente da pasta de microalga (kg m^{-3});

ρ_p : massa específica do meio poroso (kg m^{-3}).

O valor considerado para a difusividade efetiva (D_{ef}) foi determinado através da Equação 19, para cada um dos casos considerados neste estudo.

A Tabela 11 apresenta os valores encontrados para todas as propriedades listadas anteriormente. Os valores da D_{ef} estão apresentados no capítulo seguinte, na Tabela 17.

Tabela 11 - Propriedades da microalga considerada nas simulações

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa específica do meio poroso (ρ_p)	1309,44	(kg m^{-3})
Capacidade calorífica do meio poroso ($C_{p,p}$)	1997,50	($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Condutividade térmica do meio poroso (k_p)	0,1530	($\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Porosidade da pasta de microalga (ϵ_{pm})	0,47	
Massa específica aparente da pasta de microalga ($\rho_{ap,pm}$)	688,55	(kg m^{-3})

Fonte: elaborado pelo autor

O fluido inerte de suporte, assumido na hipótese ii, possui as propriedades definidas pelas Equações 23, 24 e 25. Conforme já comentado no tópico de modelagem fenomenológica, a condutividade térmica (κ_{fs}), a capacidade calorífica ($C_{p,fs}$) e a massa específica (ρ_{fs}) do

fluido suporte variam com a quantidade de água no meio poroso. De modo que no meio poroso saturado com água, as propriedades físicas do fluido suporte assumiriam o valor das propriedades da água, enquanto que no meio poroso totalmente seco, o fluido suporte assumiria as propriedades do ar seco. As propriedades físicas da água foram obtidas de Perry e Green (1999), as do ar foram retiradas de Geankoplis (2003), ambas para uma temperatura de 25°C e são mostradas na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados do ar seco e da água utilizados no cálculo das propriedades do fluido suporte

κ_{ar} ($W m^{-1} K^{-1}$)	$C_{P,ar}$ ($kJ kg^{-1} K^{-1}$)	ρ_{ar} ($kg m^{-3}$)	κ_A ($W m^{-1} K^{-1}$)	$C_{P,A}$ ($kJ kg^{-1} K^{-1}$)	ρ_A ($kg m^{-3}$)
0,026	1,0048	1,1872	0,6059	4,1795	997

Fonte: GEANKOPLIS, 2003; PERRY & GREEN, 1999

3.2.3 Detalhes da simulação

A geometria e modelos matemáticos descritos nos tópicos anteriores foram utilizadas em simulações que visaram reproduzir o comportamento observado na etapa experimental. Para tanto, os mesmo parâmetros testados naquela etapa, foram também testados na simulação. Na Tabela 13 são apresentados os parâmetros avaliados na simulação da secagem em camada delgada da pasta de microalga, bem como o tempo e o passo de tempo simulado.

Tabela 13 - Parâmetros empregados em cada simulação

Simulação	Parâmetros		Tempo simulado (min)
	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m s ⁻¹)	
1	50	1	740
2	50	2	700
3	60	1	630
4	60	2	450

Fonte: desenvolvido pelo autor

O modelo foi implementado no software COMSOL *Multiphysics*, conforme comentado no início desta sessão. Para a solução numérica, uma malha composta por 1974 elementos foi gerada.

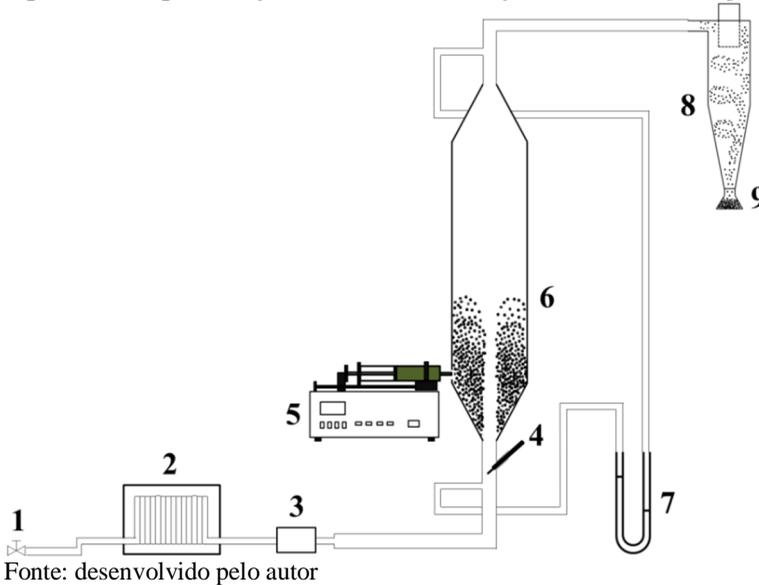
3.3 SECAGEM EM LEITO DE JORRO

A metodologia utilizada no desenvolvimento da secagem da pasta de microalga em leito de jorro pode ser dividida em três partes principais. Primeiramente é descrita a unidade experimental desenvolvida para os ensaios. Em um segundo momento são apresentadas as partículas inertes empregadas e as técnicas utilizadas para a caracterização das mesmas. Por fim, são expostos os procedimentos e parâmetros empregados durante os experimentos, que englobam a caracterização da unidade experimental e os ensaios de secagem.

3.3.1 Descrição da unidade experimental

A unidade experimental de leito de jorro utilizada para a obtenção dos dados de secagem foi construída e instalada no Laboratório de Meios Porosos (LASIPO-UFSC), conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Diagrama esquemático da unidade experimental de leito de jorro



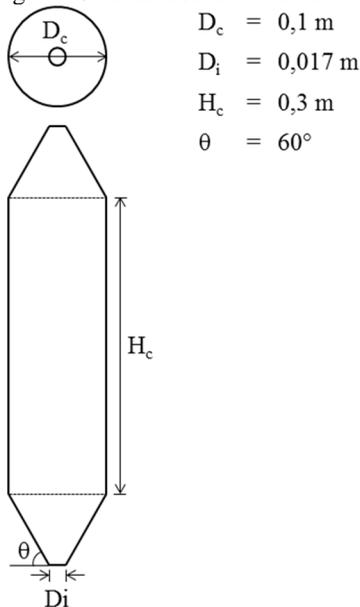
O ar alimentado (1) foi aquecido ao fluir através de uma serpentina imersa em água quente (2). Mediu-se a vazão volumétrica do ar por um medidor de ar comprimido, modelo SD6050, marca IFM

electronic (3). O ajuste da vazão do ar foi realizado por meio de válvulas do tipo agulha.

A câmara de secagem (6) é composta basicamente por uma base cônica (angulação de 60°) com 0,06 m de altura e diâmetro interno do bocal de entrada de 0,017 m, uma coluna cilíndrica de 0,3 m de altura e diâmetro de 0,1 m. A câmara de secagem foi inteiramente composta de vidro, para melhor visualização do regime de jorro.

A geometria da câmara de secagem tem influência direta na qualidade e estabilidade do regime de jorro estabelecido (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Ciente disso, as relações entre as dimensões da câmara de secagem foram escolhidas conforme recomendações de Mathur e Epstein (1974) e estão apresentadas na Figura 18.

Figura 18 - Dimensões da câmara de secagem



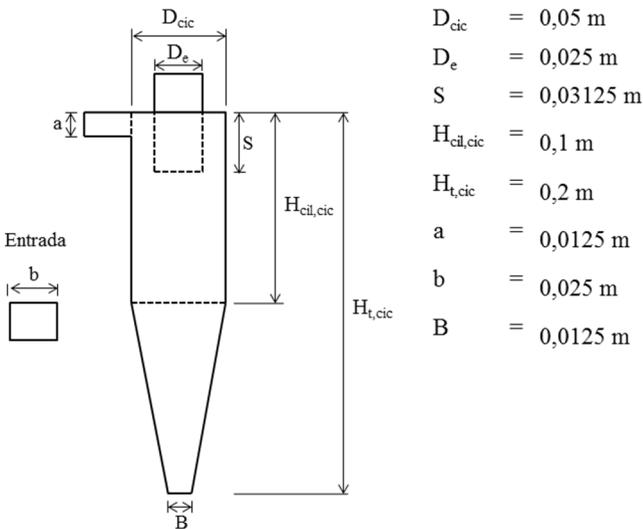
Fonte: desenvolvido pelo autor

A temperatura do ar de secagem foi medida por um termômetro digital do tipo espeto (4), localizado 0,06 m antes do bocal de entrada do ar na câmara de secagem. Para a obtenção dos dados de pressão, foi utilizado um manômetro de tubo em “U” (7), contendo mercúrio em seu interior.

A alimentação da pasta (5) no interior do leito foi realizada por meio de uma seringa acoplada a uma bomba injetora New Era Pump Systems NE-300, posicionada a 0,07 m do bocal de entrada do ar na câmara de secagem.

A coleta do produto final foi realizada por um recipiente (9) acoplado a um ciclone tipo *Lappe* (8), conectado à saída do leito de jorro. Este ciclone foi construído em vidro, com diâmetro de coluna de 0,05 m. Na Figura 19 é apresentado o desenho esquemático detalhado do ciclone, bem como suas dimensões.

Figura 19 - Detalhes e dimensões do ciclone tipo Lapple utilizado



Fonte: desenvolvido pelo autor

3.3.2 Descrição e caracterização dos materiais utilizados

3.3.2.1 Partículas inertes

Para a condução dos experimentos, utilizaram-se partículas do copolímero etileno-acetato de vinila (EVA), as quais foram caracterizadas quanto ao diâmetro médio de partícula ($d_{p,EVA}$), massa específica da partícula ($\rho_{p,EVA}$), massa específica aparente ($\rho_{ap,EVA}$) e porosidade média do leito estático (ϵ_{EVA}).

A uniformização das partículas inertes foi realizada utilizando-se um conjunto de peneiras onde foram separadas para a utilização nos

experimentos somente as partículas retidas entre as peneiras de 6 mesh (3,36 mm) e 7 mesh (2,83 mm).

A massa específica da partícula ($\rho_{p,EVA}$) é definida como a razão entre a massa e o volume total da partícula, incluindo o volume que os poros ocupam. A determinação da $\rho_{p,EVA}$ (Equação 42) foi realizada pelo método de deslocamento de líquido, utilizando um picnômetro calibrado e, como fluido, água destilada.

$$\rho_{p,EVA} = \frac{m_{EVA}}{V_{pic} - \frac{m_A}{\rho_A}} \quad (42)$$

Onde:

m_{EVA} : massa de partículas de EVA (kg);

m_A : massa de água (kg);

ρ_A : massa específica da água (kg m^{-3});

V_{pic} : volume do picnômetro (m^3).

A massa específica aparente do leito de partículas ($\rho_{ap,EVA}$) é definida como a razão entre a massa das partículas e o volume que elas ocupam em um recipiente quando em arranjo normal, ou seja, quando dispostas em queda livre em um recipiente de volume calibrado. Para tal determinação, utilizou-se uma proveta graduada (Equação 43).

$$\rho_{ap,EVA} = \frac{m_{EVA}}{V_{leito}} \quad (43)$$

Onde:

m_{EVA} : massa de partículas de EVA (kg);

V_{recp} : volume do leito de EVA (m^3).

A porosidade média do leito estático (ε_{EVA}) foi obtida colocando-se um volume conhecido de partículas em uma proveta e em seguida foi adicionado água até a altura ocupada pelas partículas. Desta forma, a porosidade foi determinada como a razão entre o volume de água utilizado e o volume ocupado pelo leito de EVA (Equação 44).

$$\varepsilon_{EVA} = \frac{V_A}{V_{leito}} \quad (44)$$

Onde:

V_A : volume de água (m^3);

V_{EVA} : volume do leito de EVA (m^3).

3.3.3 Metodologia experimental

A metodologia experimental desenvolvida para este estudo engloba duas etapas. Inicialmente, a caracterização fluidodinâmica do leito de jorro foi realizada. Com base nos resultados obtidos nesta primeira etapa, definiram-se os parâmetros que seriam utilizados nos ensaios de secagem da pasta de microalga, que representam a segunda etapa da metodologia experimental.

3.3.3.1 Caracterização da unidade experimental

A caracterização da unidade experimental consistiu na obtenção de curvas fluidodinâmicas, conforme a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974). As curvas características do leito de jorro foram determinadas com o ar de secagem a temperatura ambiente, o que foi posteriormente corrigido para a temperatura de secagem.

Para a realização deste procedimento adicionou-se na câmara de secagem, apresentada na Figura 18, uma massa pré-determinada de partículas inertes, de modo que ocupassem uma altura de 0,08 m a partir da base inferior do leito. Essa altura foi escolhida com base em testes anteriores. Em seguida, iniciou-se o aumento gradativo da vazão de ar até que o regime de jorro fosse estabelecido. Feito isso, realizou-se o processo inverso, ou seja, a vazão de ar no leito foi gradativamente diminuída, até ser zerada.

Nos experimentos relatados acima, a queda de pressão registrada foi causada não apenas pelo leito de partículas inertes, mas também pelo equipamento. Para a determinação da queda de pressão ocasionada apenas pelo equipamento, seguiu-se o mesmo procedimento descrito anteriormente, no entanto os experimentos foram conduzidos para o leito vazio, sem a presença das partículas inertes. Posteriormente, através de uma equação de ajuste da queda de pressão do equipamento em função da velocidade do ar de entrada no leito, esses valores foram descontados da queda de pressão total, resultando na queda de pressão causada somente pelo leito de partículas inertes.

Durante os experimentos relatados acima, foram coletados os dados da vazão do ar e da queda de pressão no leito.

Conforme afirmado anteriormente, a correção da vazão de ar considerando a temperatura de secagem é necessária, uma vez que com o aumento da temperatura, o ar sofre expansão. Para tanto, utilizou-se a relação apresentada na Equação 45, proveniente da Equação dos Gases Ideais (VAN WYLEN; SONNTAG, 1993).

$$\frac{Q_1 \times P_1}{T_1} = \frac{Q_2 \times P_2}{T_2} \quad (45)$$

Onde:

Q_1 : vazão volumétrica do ar no estado 1 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

P_1 : pressão do ar no estado 1 (atm);

T_1 : temperatura do ar no estado 1 (K);

Q_2 : vazão volumétrica do ar no estado 2 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

P_2 : pressão do ar no estado 2 (atm);

T_2 : temperatura do ar no estado 2 (K).

Os valores de vazão medidos foram transformados em valores de velocidade no bocal de entrada do leito através da Equação 46.

$$Q_{\text{ar}} = v_{\text{ar}} \times A_{\text{ar}} \quad (46)$$

Onde:

Q_{ar} : vazão volumétrica de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

v_{ar} : velocidade do ar na entrada do leito (m s^{-1});

A_{ar} : área do bocal de entrada do ar no leito (m^2).

Os dados da vazão do ar e da queda de pressão no leito coletados durante os experimentos permitiram a obtenção da curva característica da queda de pressão e da velocidade mínima de jorro para o leito em estudo.

3.3.3.2 Procedimento experimental de secagem

Os experimentos de secagem realizados tiveram como objetivo principal estabelecer uma relação entre a vazão de alimentação da pasta na câmara de secagem e os aspectos qualitativos e quantitativos do pó produzido. Desta forma, este foi o único parâmetro variado durante os experimentos. A velocidade do ar na entrada do leito (v_{ar}) foi mantida na faixa de 5 % acima da velocidade mínima de jorro (v_{mj}), de modo a

garantir a estabilidade do regime de jorro, e a temperatura do ar foi mantida em 60°C.

Os parâmetros empregados em cada experimento estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros empregados nos experimentos de secagem em leito de jorro

Experimento	Parâmetros		
	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m s ⁻¹)	Alimentação da biomassa (mL min ⁻¹)
1	60	28	0,20
2			0,25
3			0,30
4			0,35
5			0,40
6			0,45
7			0,50

Fonte: desenvolvido pelo autor

Para cada uma das condições especificadas, esperava-se o sistema entrar em regime permanente e, então, iniciava-se a alimentação da biomassa. Cerca de 20,60 g de biomassa foi alimentada em cada experimento e, a partir disso, acompanhou-se a massa de pó produzido, em intervalos de 10 min.

O processo era encerrado quando não fosse mais observada produção de pó, seja visualmente e também através das medidas da massa de pó na saída do ciclone. Antes do início de um novo processo efetuava-se a limpeza no leito e troca das partículas inertes por partículas limpas.

Os experimentos foram feitos em duplicata e de forma aleatória.

A velocidade de produção de pó ($v_{pó}$) foi calculada utilizando a Equação 47.

$$v_{pó} = \frac{\left(\frac{P_{pó,t} - P_{pó,t-dt}}{dt} \right) + \left(\frac{P_{pó,t+dt} - P_{pó,t}}{dt} \right)}{2} \quad (47)$$

Onde:

$P_{pó,t}$: produção de pó no tempo t (g de pó produzido);

$P_{pó,t-dt}$: produção de pó no tempo t-dt (g de pó produzido);

$P_{pó,t+dt}$: produção de pó no tempo $t+dt$ (g de pó produzido).

O primeiro e o último valores de $v_{pó}$ são calculados segundo a Equação 48.

$$v_{pó} = \frac{P_{pó,t+dt} - P_{pó,t}}{dt} \quad (48)$$

Onde:

$P_{pó,t+dt}$: produção de pó no tempo $t+dt$ (g de pó produzido);

$P_{pó,t}$: produção de pó no tempo t (g de pó produzido);

3.3.3.3 Desempenho do processo de secagem

O desempenho do secador em leito de jorro foi avaliado através do percentual de recuperação do produto (R_p), massa acumulada na câmara de secagem (m_{ac}) e eficiência na produção de pó ($\eta_{pó}$).

O percentual de recuperação do produto foi determinado pela Equação 49 (DOTTO et al., 2011).

$$R_p = \frac{m_{pó,p}(1 - X_{bu,pó})}{m_i} \cdot 100 \quad (49)$$

Onde:

$m_{pó,p}$: massa de pó produzido (g);

$X_{bu,pó}$: umidade do pó produzido, em base úmida (g água g⁻¹ de pó);

m_i : massa de pasta de microalga introduzida no secador (g).

A massa acumulada na câmara de secagem, em gramas, foi determinada através de um balanço de massa (Equação 50).

$$m_{ac} = \frac{m_i - (m_i \cdot X_{bu,i}) - m_{pó,p} + (m_{pó,p} \cdot X_{bu,pó})}{1 - X_{bu,ac}} \quad (50)$$

Onde:

m_i : massa de pasta de microalga introduzida no secador (g);

$X_{bu,i}$: umidade da pasta de microalga introduzida no secador, em base úmida (g água g de pasta de microalga⁻¹);

$m_{pó,p}$: massa de pó produzido (g);

$X_{bu,pó}$: unidade do pó produzido, em base úmida (g água g de pó⁻¹);

$X_{bu,ac}$: unidade da massa acumulada no leito, em base úmida (g água g de material acumulado no leito⁻¹).

A eficiência na produção de pó, em %, foi determinada através da Equação 51 (MEDEIROS et al., 2004).

$$\eta_{pó} = \frac{m_{pó,p}(1 - X_{bu,pó})}{m_i(1 - X_{bu,i})} \cdot 100 \quad (51)$$

Onde:

$m_{pó,p}$: massa de pó produzido (g);

$X_{bu,pó}$: unidade do pó produzido, em base úmida (g água g de pó⁻¹);

m_i : massa de pasta de microalga introduzida no secador (g);

$X_{bu,i}$: unidade da pasta de microalga introduzida no secador, em base úmida (g água g de pasta de microalga⁻¹).

A estimativa da produção de pó seco por unidade de tempo foi calculada simplesmente dividindo o total de pó produzido pelo tempo de processo.

3.3.3.4 Propriedades do pó produzido

O diâmetro de corte do ciclone (d_{pc}) foi calculado pela Equação 52 (THEODORE; PAOLA, 1980).

$$d_{pc} = \left(\frac{9\mu_{ar} b}{2\pi N e v (\rho_{ar} - \rho_{pó})} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (52)$$

Onde:

μ_{ar} : viscosidade do ar (kg s m⁻²);

b : largura da entrada do ciclone;

Ne : número de voltas que o gás executa no interior do ciclone, no caso de um ciclone Lapple o valor usado é de 5;

v : velocidade de alimentação do ar (m s⁻¹);

$\rho_{pó}$: massa específica do pó (kg m⁻³);

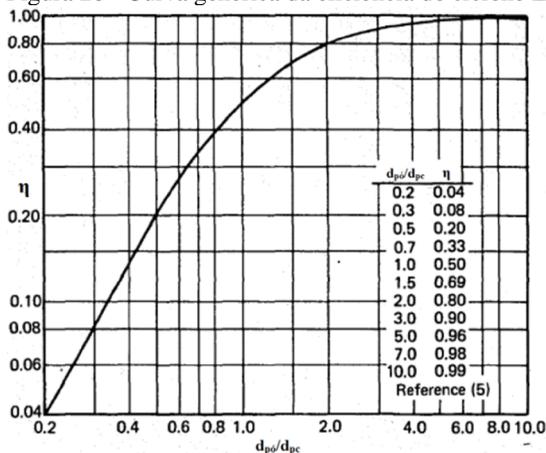
ρ_{ar} : massa específica do ar (kg m⁻³).

A massa específica do pó ($\rho_{pó}$) foi determinada por picnometria a gás hélio, utilizando o equipamento Accupyc II 1340, da Micromeritics.

O diâmetro de corte representa o diâmetro de partículas que o ciclone irá coletar com uma eficiência de 50 %. O diâmetro de corte de um ciclone depende das propriedades do sólido, das propriedades do gás, do tamanho do ciclone e das condições operacionais (LAPPLE, 1951 apud SILVA, 2006).

A Figura 20 apresenta uma curva proposta por Lapple, com base em dados experimentais, que relaciona a eficiência de um ciclone com a razão entre o diâmetro médio das partículas de pó coletadas pelo ciclone (d_{p0}) e o diâmetro de corte do ciclone.

Figura 20 - Curva genérica da eficiência do ciclone Lapple



Fonte: Lapple, 1951 apud Theodore e Paola 1980

Em posse dos valores da eficiência na coleta de pó, dada pela Equação 49, e do diâmetro de corte do ciclone, dado pela Equação 50, é possível determinar o diâmetro médio das partículas coletadas pelo ciclone Lapple.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA SECA

A microalga seca pelos métodos de secagem em camada delgada e secagem em leito de jorro foi caracterizada quanto ao teor de proteína e lipídios. Analisou-se o produto da secagem em camada delgada na condição de 60°C e 2 m s⁻¹ e, para o caso do leito em jorro, a amostra

analisada corresponde a uma mistura dos produtos da secagem para os casos de alimentação de 0,2, 0,35, 0,25 e 0,40 mL min⁻¹.

As análises do teor de proteína e lipídios foram realizadas por um laboratório externo, segundo as normas AOAC 992.15 e AOAC 991.36, respectivamente. Para as análises de proteína, o fator de nitrogênio utilizado foi de 6,25.

A qualidade do produto final foi avaliada por testes qualitativos de reidratação. No processo de reidratação, o produto seco é colocado em contato com água com o objetivo de restaurar as propriedades da matéria-prima. Esta técnica caracteriza a qualidade do produto final e indica os danos provocados pela secagem aos tecidos e estrutura porosa dos produtos desidratados (DUARTE et al., 2009; MARTINS; PINTO, 2003).

Os testes de reidratação consistiram na pesagem de aproximadamente 1 g de produto seco pelas duas técnicas de secagem, para todos os casos considerados, e adição de 10 mL de água destilada.

A mistura foi submetida a agitação, por uma hora, a temperatura ambiente. Após, foram deixadas 24 horas em repouso a fim de avaliar a decantação. Os testes foram fotografados após a agitação e após 1, 3 e 24 horas de repouso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no estudo da secagem da microalga *Scenedesmus acuminatus* pelas técnicas de secagem em camada delgada e em leito de jorro, e as respectivas discussões. Em um primeiro momento, os resultados referentes à caracterização da microalga em questão são apresentados. Na sequência, são apresentados os resultados obtidos através da secagem em camada delgada da pasta, nas abordagens experimental e computacional. Esta última abordagem inclui os subtópicos de apresentação da malha gerada para a discretização do problema, do ajuste do modelo de isoterma de adsorção aos dados experimentais e dos perfis de umidade e de temperatura obtidos nas simulações. Neste tópico pode-se observar ainda uma comparação entre os dados de água evaporada obtidos no experimento e no estudo computacional. Em seguida, são relatados os resultados obtidos através da secagem da pasta de microalga em leito de jorro. Neste tópico são apresentados os resultados relacionados à caracterização das partículas inertes, caracterização fluidodinâmica do leito de jorro e análise do processo de secagem. Este capítulo contempla ainda os resultados e discussão acerca da caracterização da biomassa seca pelos dois métodos de secagem estudados.

4.1 BIOMASSA DE MICROALGA

A caracterização da pasta de microalga quando à umidade (X_0) e massa específica aparente ($\rho_{ap,pm}$) foi realizada e os resultados estão apresentados na Tabela 15.

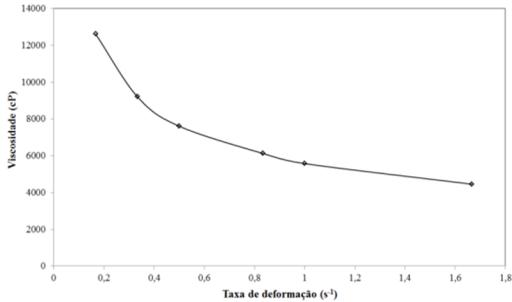
Tabela 15 - Caracterização da microalga *Scenedesmus acuminatus*

Caracterização	Valor
X_0	2,83 kg de água kg de microalga seca ⁻¹
$\rho_{ap,pm}$	688,55 kg m ⁻³

Fonte: desenvolvido pelo autor

Para o caso da secagem em leito de jorro, a pasta de microalga foi diluída até a umidade de 3,69 kg de água kg de microalga seca⁻¹, a fim de facilitar sua injeção na câmara de secagem. A viscosidade aparente da pasta utilizada nos experimentos de secagem em leito de jorro, em função da taxa de deformação, está apresentada na Figura 21.

Figura 21 - Viscosidade aparente da pasta de microalga *Scenedesmus acuminatus* em função da taxa de deformação



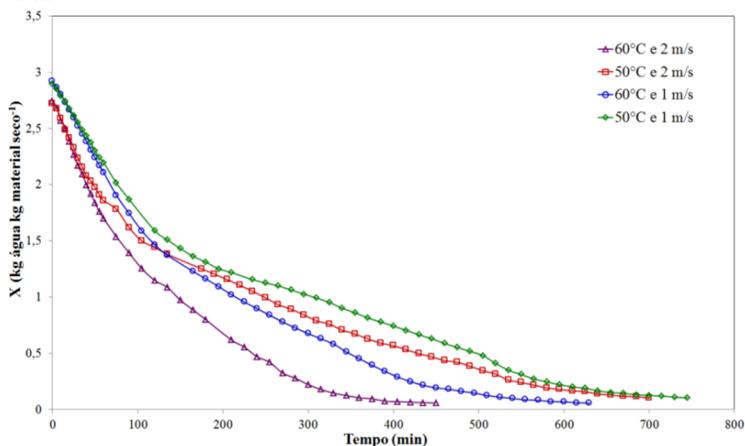
Fonte: desenvolvido pelo autor

4.2 SECAGEM EM CAMADA DELGADA

4.2.1 Estudo experimental

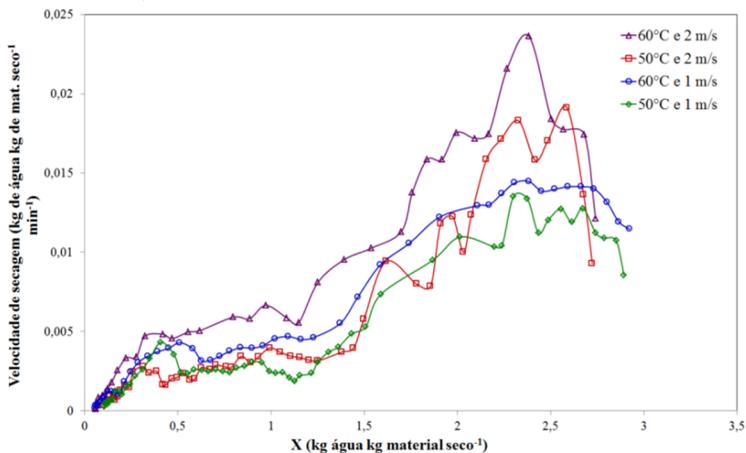
As curvas que mostram o comportamento de secagem em camada delgada da microalga *Scenedesmus acuminatus* nos testes conduzidos estão apresentadas nas Figuras 22 e 23. Na Figura 22, o teor de umidade é plotado em função do tempo, na Figura 23, é apresentada a curva da velocidade de secagem em função do teor de umidade do material.

Figura 22 - Curva de secagem da pasta de microalga *Scenedesmus acuminatus* nas condições de secagem: 50°C e 1 m s⁻¹, 50°C e 2 m s⁻¹, 60°C e 1 m s⁻¹ e 60°C e 2 m s⁻¹



Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 23 - Curva da velocidade de secagem em função do teor de umidade da microalga *Scenedesmus acuminatus* nas condições de secagem: 50°C e 1 m s⁻¹, 50°C e 2 m s⁻¹, 60°C e 1 m s⁻¹ e 60°C e 2 m s⁻¹



Fonte: desenvolvido pelo autor

A análise das Figuras 22 e 23 possibilita a visualização de diferentes períodos de secagem em todas as condições estudadas.

De uma forma geral, para todas as condições estudadas, nos primeiros minutos do processo, percebe-se um período de aquecimento do material, seguido pelo período de secagem à taxa constante. Neste período pode-se visualizar uma variação mais acentuada do teor de umidade do material com o tempo. O tempo em que a secagem ocorre no período à taxa constante e o percentual de água evaporada neste período estão apresentados na Tabela 16, para os quatro casos. Na sequência, observa-se uma segunda etapa, que corresponde à variação menos acentuada da umidade com o tempo. Esta etapa é conhecida como período de secagem à taxa decrescente. Nos casos estudados, é possível visualizar o primeiro e o segundo períodos de secagem à taxa decrescente. O primeiro período de taxa decrescente estende-se até 300 min aproximadamente e é caracterizado por uma variação acentuada do teor de umidade do material com o tempo. O segundo período de taxa decrescente é observado na sequência e até o final do processo. Neste período, a superfície da pasta de microalga não está mais saturada e a velocidade de secagem é governada pelo movimento da umidade no material.

Tabela 16 - Tempo e percentual de água evaporada no período de secagem à taxa constante

Parâmetros	Tempo do período de secagem à taxa constante (min)	Percentual de água evaporada (%)
50°C e 1 m s ⁻¹	75	30,00
50°C e 2 m s ⁻¹	55	29,23
60°C e 1 m s ⁻¹	75	33,51
60°C e 2 m s ⁻¹	50	31,46

Fonte: desenvolvido pelo autor

O período de secagem a taxa constante é relativamente pequeno, e sua contribuição para a secagem da biomassa é de, no máximo, 33 %, que ocorre para o experimento nas condições de 60°C e 1 m s⁻¹. De acordo com Babalis e Belessiotis (2004), este comportamento é típico de frutas e materiais biológicos, que, em algumas vezes, não apresentam este período.

Curvas de secagem com comportamento semelhante podem ser encontradas na literatura para espécies de microalgas como *Aphanothece Nägeli* (LOPES et al., 2006), *Spirulina platensis* (DESMORIEUX; DECAEN, 2005), *Arthrospira platensis* (DISSA et al., 2010) e na mistura das espécies *Chlorella minutissima*, *Chlamydomonas globosa*, *Scenedesmus bijuga* (VISWANATHAN et al., 2012). Comportamento semelhante também foi encontrado por Velic et al. (2004) e Babalis e Belessiotis (2004), ao secarem, maçã e figo, respectivamente. Oliveira et al. (2009) não observaram a ocorrência do período de taxa constante ao secarem *Spitulina platensis*. O mesmo aconteceu com Doymaz (2009), ao secar maçã verde.

A partir destes resultados, pode-se afirmar que o processo de secagem da microalga ocorreu principalmente durante o período de secagem à taxa decrescente, assim como observado por Oliveira (2006) e por Dissa et al. (2010). Esse fato demonstra, segundo apontado por diversos autores, que a difusão é o mecanismo dominante no transporte de umidade na pasta de microalga (DISSA et al., 2010; DOYMAZ, 2009; LOPES et al., 2007).

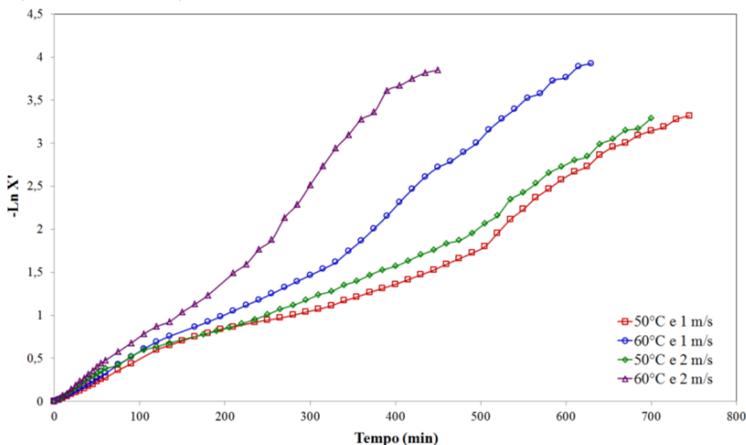
O efeito da temperatura no comportamento de secagem da pasta de microalga pode ser visualizado na Figura 22. Pode-se observar que para os processos submetidos à maior temperatura, o teor de umidade do material decresce de forma mais intensa e, como consequência, a secagem é mais rápida.

O efeito da velocidade do ar de secagem também pode ser evidenciado na Figura 22. A influência deste parâmetro é significativa no início do processo de secagem, implicando que o processo de evaporação ocorreu na superfície e foi, portanto, mais diretamente afetado pela velocidade do ar. Em seguida, o efeito da velocidade do ar de secagem torna-se menos importante quando comparado ao efeito da temperatura do ar, o que pode ser evidenciado pelo afastamento das curvas de secagem obtidas pelos processos submetidos à mesma velocidade do ar (BABALIS; BELESSIOTIS, 2004).

Os resultados experimentais estão de acordo com aqueles reportados na literatura para materiais biológicos em que a temperatura do ar é considerada o fator de maior efeito na velocidade de secagem. A velocidade de secagem é consideravelmente aumentada quando maiores temperaturas são usadas, conforme relatado por Babalis e Belessiotis (2004) para figo, Oliveira et al. (2009) para *Spirulina platensis*, Viswanathan et al. (2012), para mistura de *Chlorella minutissima*, *Chlamydomonas globosa*, *Scenedesmus bijuga* e Desmorieux e Decaen (2005), para *Spirulina platensis*.

As curvas experimentais do logaritmo natural do teor de umidade livre adimensional ($\ln X'$) como função do tempo de secagem foram usadas para calcular os valores da constante de secagem (K) e estão apresentadas na Figura 24.

Figura 24 - Curvas experimentais do logaritmo natural do teor de umidade livre adimensional como função do tempo de secagem nas condições de: 50°C e 1 m s⁻¹, 50°C e 2 m s⁻¹, 60°C e 1 m s⁻¹ e 60°C e 2 m s⁻¹



Fonte: desenvolvido pelo autor

Na Tabela 17 são apresentadas informações relacionadas ao tempo de secagem, à umidade do produto final, à constante de secagem e à difusividade efetiva para cada um dos casos estudados.

Tabela 17 - Tempo de secagem, umidade final do produto, constante de secagem e difusividade efetiva da microalga *Scenedesmus acuminatus* para os casos estudados

Parâmetros	Tempo de secagem (min)	Umidade final (%) b.s.)	K (s ⁻¹)	R ²	D _{ef} (m ² s ⁻¹)
50°C e 1 m s ⁻¹	745	9,47	4,2×10 ⁻⁵	0,9711	1,53×10 ⁻¹⁰
50°C e 2 m s ⁻¹	700	9,22	7,33×10 ⁻⁵	0,9862	2,68×10 ⁻¹⁰
60°C e 1 m s ⁻¹	630	5,46	1,03×10 ⁻⁴	0,9860	3,77×10 ⁻¹⁰
60°C e 2 m s ⁻¹	450	5,51	1,48×10 ⁻⁴	0,9874	5,41×10 ⁻¹⁰

*b.s. – base seca

Fonte: desenvolvido pelo autor

Observa-se que a constante de secagem aumenta com o aumento da temperatura. A dependência da constante de secagem com a temperatura foi previamente observada por outros autores (LOPES et al., 2007; VISWANATHAN et al., 2012).

Os valores observados para D_{ef} variam de 1,53×10⁻¹⁰ até 5,41×10⁻¹⁰ m² s⁻¹ e encontram-se dentro da faixa geral para alimentos, que varia de 10⁻¹¹ até 10⁻⁹ m² s⁻¹ (ZOGZAS, MAROULIS, MARINOS-KOURIS, 1996 apud BABALIS, 2004). Os valores encontrados estão na mesma ordem de grandeza dos determinados por Dissa et al. (2010) 1,060×10⁻¹⁰, 1,082×10⁻¹⁰ e 1,670×10⁻¹⁰ m² s⁻¹ ao secarem cilindros de *Arthrospira platensis* de 3, 4 e 6 mm, respectivamente. E ainda aos encontrados por Oliveira et al. (2009), 0,286×10⁻¹⁰, 0,342×10⁻¹⁰ e 0,233×10⁻¹⁰ m² s⁻¹ ao secarem *Spirulina platensis* em cilindros de 3 mm por 180, 150, 220 e 205 min.

Segundo Viswanathan et al. (2012), a difusividade efetiva é um indicador da taxa de remoção de umidade das células da microalga. Assim, quanto menor for o valor de D_{ef}, maior é a resistência para a umidade se difundir através do meio poroso até a superfície. Ainda segundo o mesmo autor, os valores de D_{ef} são significativamente aumentados em altas temperaturas de secagem, tal qual foi constatado neste estudo.

A umidade final da biomassa seca obtida por todos os experimentos encontra-se abaixo do limite de umidade comercial de 10 %, em base seca.

Os resultados apresentados na Tabela 17 mostram que os parâmetros testados influenciam no tempo de secagem. Uma redução de aproximadamente 40 % no tempo de secagem foi observada se forem considerados os dois casos extremos estudados (50°C e 1 m s^{-1} e 60°C e 2 m s^{-1}). O tempo de secagem influencia diretamente na produção do processo, conforme pode ser verificado na Tabela 18.

Tabela 18 - Produtividade dos experimentos de secagem da biomassa em camada delgada

Parâmetros	Produção (g h^{-1})
50°C e 1 m s^{-1}	2,91
50°C e 2 m s^{-1}	3,21
60°C e 1 m s^{-1}	3,25
60°C e 2 m s^{-1}	4,82

Fonte: desenvolvido pelo autor

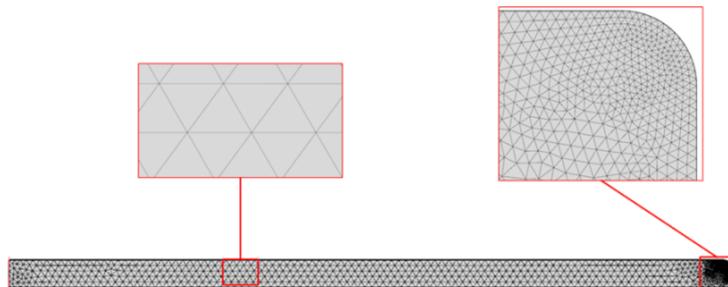
Conforme o esperado, a maior produção de biomassa seca ocorreu no experimento 4, caso em que o tempo de secagem foi menor.

4.2.2 Estudo computacional

4.2.2.1 Malha gerada

A malha gerada para a resolução numérica do sistema de equações diferenciais que descrevem o problema em estudo está apresentada na Figura 25. Uma malha extremamente fina foi criada, a fim de obter melhores resultados.

Figura 25 - Malha gerada para a simulação



Fonte: desenvolvido pelo autor

A malha de refinamento possui 1974 elementos, com qualidade média de 0,9641.

4.2.2.2 Isoterma de equilíbrio higroscópico

Os resultados de ajuste do modelo de isoterma de Henderson (Equação 36) aos dados de Desmorieux e Decaen (2005) estão na Tabela 19.

Tabela 19 - Constantes dos modelos de isoterma ajustados

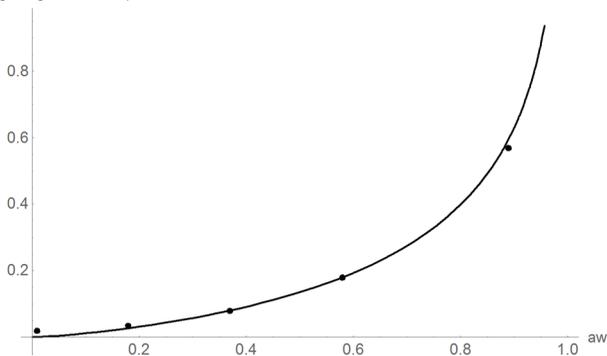
Modelo	Constante	
	m	n
Henderson	3,3	0,78

Fonte: desenvolvido pelo autor

Na Figura 26, é possível visualizar o modelo ajustado aos pontos experimentais.

Figura 26 - Modelo de isoterma de Henderson ajustado aos pontos experimentais

X_{eq} (kg água/kg sólido seco)



Fonte: desenvolvido pelo autor

4.2.2.3 Perfil de umidade

A concentração inicial de água utilizada nas simulações foi baseada nos dados experimentais e está apresentada na Tabela 20, para os quatro casos estudados. Considera-se que, no início do processo de secagem, a umidade esteja uniformemente distribuída ao longo da espessura.

Tabela 20 - Concentração inicial de água na microalga, para todos os casos estudados

Parâmetros	Concentração inicial de água (mol m⁻³)
50°C e 1 m s ⁻¹	87.285,79
50°C e 2 m s ⁻¹	85.393,95
60°C e 1 m s ⁻¹	86.852,77
60°C e 2 m s ⁻¹	86.245,91

Fonte: desenvolvido pelo autor

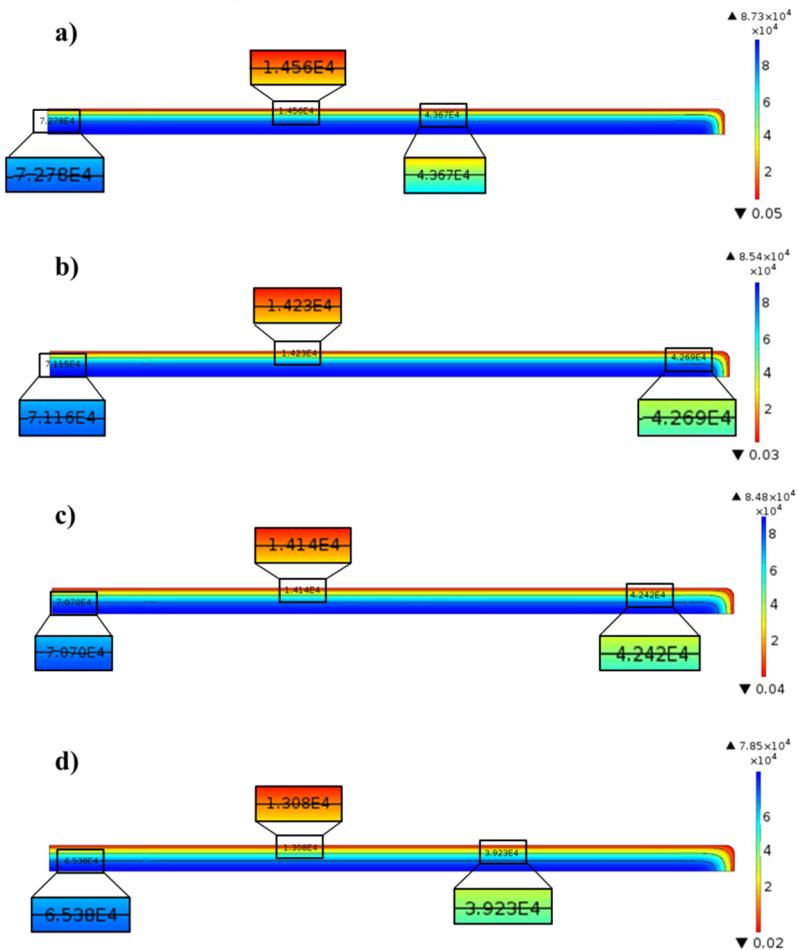
Nas Figuras 27-30 estão apresentadas imagens comparativas dos perfis de umidade ao longo da espessura do domínio para as quatro condições consideradas, nos tempos de 50, 100 e 300 min e para o tempo final de secagem. Os perfis de umidade correspondem à concentração de água ao longo da espessura da pasta de microalga, dada em mol m⁻³.

As linhas de contorno, em destaque nas Figuras 27-30, representam o valor da concentração de água naquela espessura.

Os perfis de umidade observados podem ser relacionados ao modelo utilizado para o cálculo do D_{ef} (Equação 15), que desconsidera a resistência externa, e às condições de contorno 30-b e 30-c, que estabelecem que a transferência de massa ocorre apenas nas superfícies superior e lateral do domínio considerado. Logo, é natural que a concentração de água seja menor nestas superfícies do que na borda inferior, tal qual evidenciado nas Figuras 27-30.

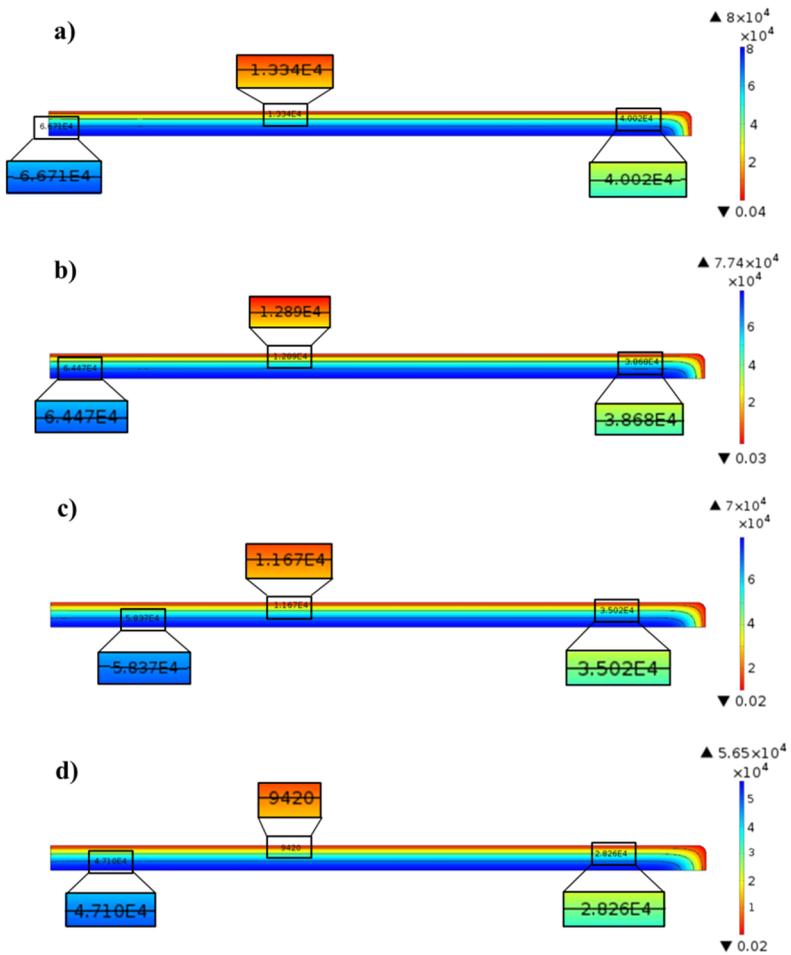
Os perfis de umidade apresentam padrão semelhante para os quatro casos estudados. Certa similaridade entre os valores de concentração de água para os processos à mesma temperatura pode ser observada em todos os tempos analisados, sendo que para o tempo final, esta similaridade é mais evidente.

Figura 27 - Perfis de umidade (mol m^{-3}) ao longo da espessura da pasta de microalga para o tempo de secagem de 50 min, nas condições de: a) 50°C e 1 m s^{-1} , b) 50°C e 2 m s^{-1} , c) 60°C e 1 m s^{-1} e d) 60°C e 2 m s^{-1}



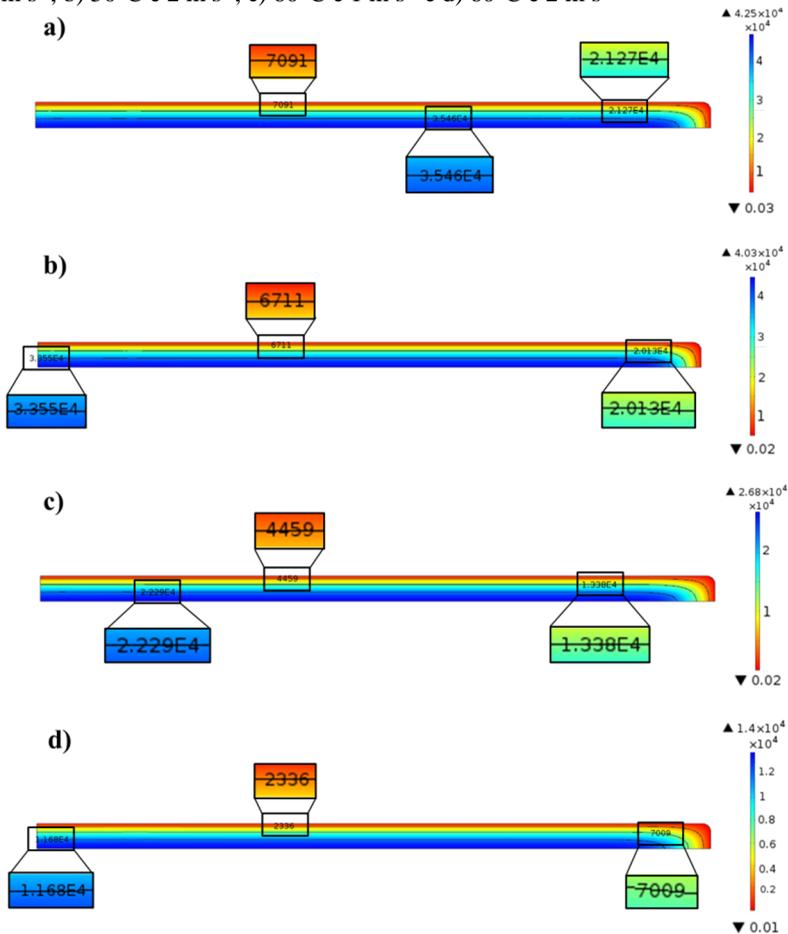
Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 28 - Perfis de umidade (mol m^{-3}) ao longo da espessura da pasta de microalga para o tempo de secagem de 100 min, nas condições de: a) 50°C e 1 m s^{-1} , b) 50°C e 2 m s^{-1} , c) 60°C e 1 m s^{-1} e d) 60°C e 2 m s^{-1}



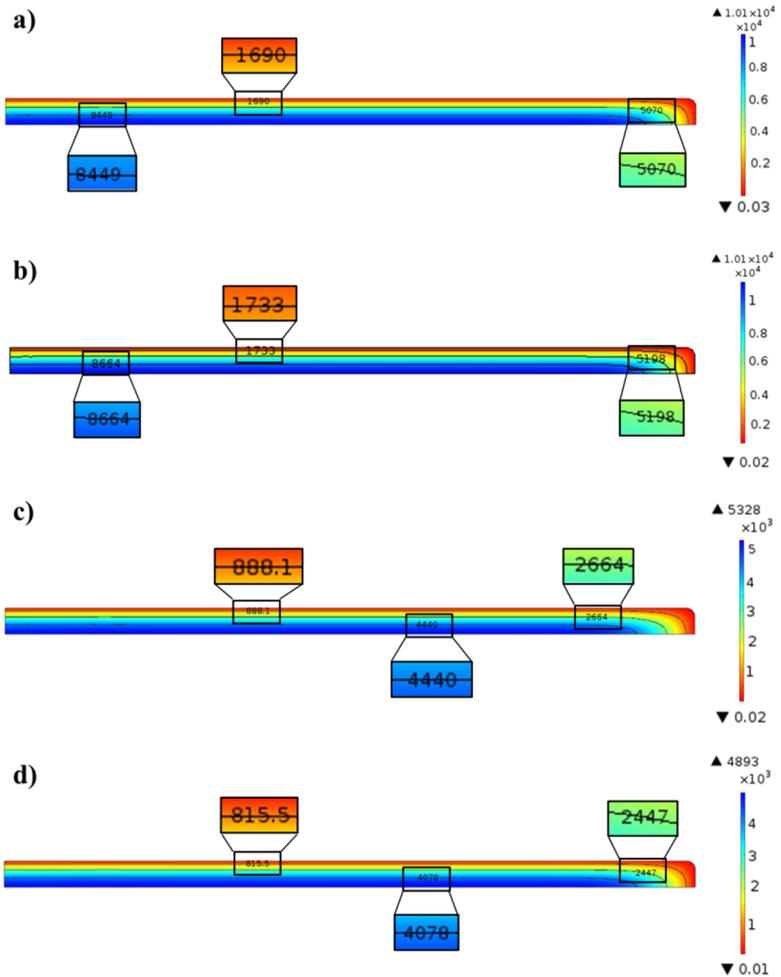
Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 29 - Perfis de umidade (mol m^{-3}) ao longo da espessura da pasta de microalga para o tempo de secagem de 300 min, nas condições de: a) 50°C e 1 m s^{-1} , b) 50°C e 2 m s^{-1} , c) 60°C e 1 m s^{-1} e d) 60°C e 2 m s^{-1}



Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 30 - Perfis de umidade (mol m^{-3}) ao longo da espessura da pasta de microalga para o tempo final de secagem, nas condições de: a) 50°C e 1 m s^{-1} , b) 50°C e 2 m s^{-1} , c) 60°C e 1 m s^{-1} e d) 60°C e 2 m s^{-1}

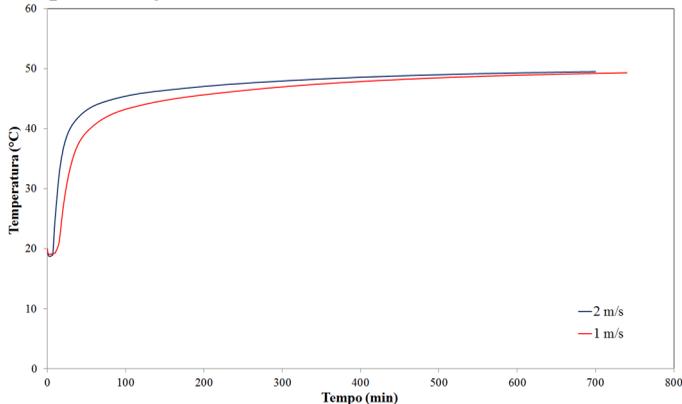


Fonte: desenvolvido pelo autor

4.2.2.4 Perfil de temperatura

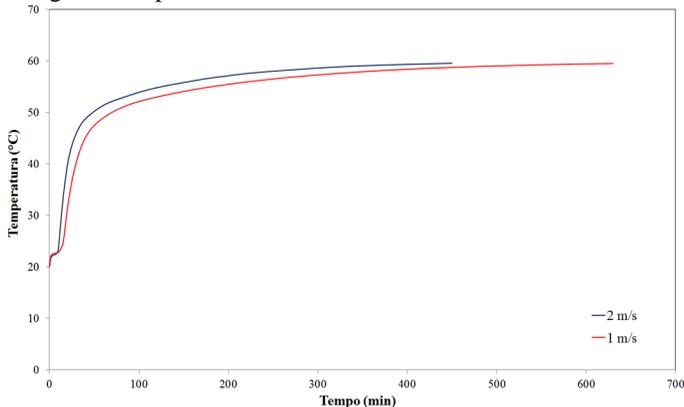
A evolução da temperatura média no volume considerado ao longo do tempo está apresentada na Figura 31 e na Figura 32, para os casos a temperatura de 50°C e 60°C, respectivamente.

Figura 31 - Evolução da temperatura média ao longo do tempo, para os casos de secagem à temperatura de 50°C



Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 32 - Evolução da temperatura média ao longo do tempo, para os casos de secagem à temperatura de 60°C

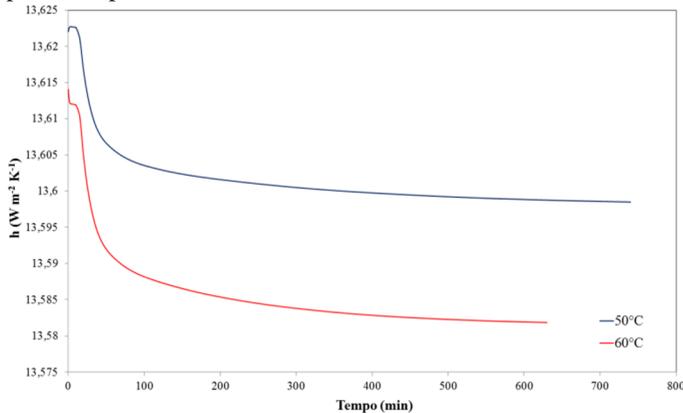


Fonte: desenvolvido pelo autor

A análise das Figura 31 e Figura 32 permite a conclusão que, para as duas temperaturas consideradas, o caso em que a velocidade do ar é

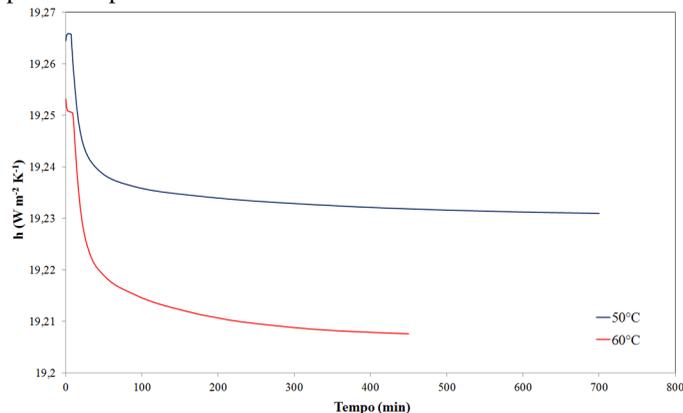
maior, alcançou a temperatura de secagem mais rapidamente. Isso acontece porque a transferência de calor convectiva, que ocorre entre o ar de secagem e a superfície da microalga, está diretamente ligada às condições a que o ar de secagem está submetido. A velocidade do ar tem influência direta no valor do coeficiente convectivo de transferência de calor (h) e, conseqüentemente, na transferência de calor (Figura 33 e Figura 34) (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

Figura 33 - Coeficiente convectivo de transferência de calor ao longo do tempo para os experimentos com velocidade de ar de 1 m s^{-1}



Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 34 - Coeficiente convectivo de transferência de calor ao longo do tempo para os experimentos com velocidade de ar de 2 m s^{-1}



Fonte: desenvolvido pelo autor

O cálculo do h é realizado pelo software *COMSOL Multiphysics*, baseado na condição de contorno apresentada pela Equação 26-b. Esta equação mostra que o valor do h é afetado pela temperatura do ar (T_{ext}), pela temperatura da pasta de microalga (T_{pm}) e pela condutividade térmica do fluido suporte (κ_{fs}).

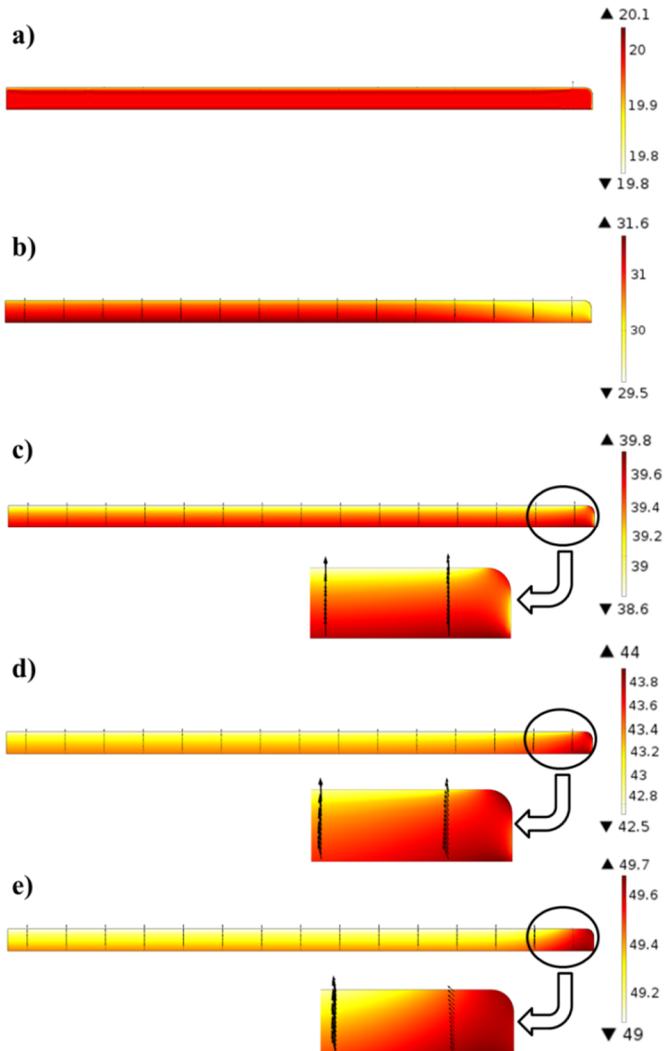
A T_{ext} mantém-se constante ao longo do processo, já a T_{pm} segue o comportamento apresentado pelas Figuras 31 e 32, aumentando ao longo do tempo.

O valor do κ_{fs} varia com a quantidade de água no meio poroso. No início do processo, o κ_{fs} corresponde ao valor de κ_{A} . Ao longo do tempo, com a redução da umidade no material, o κ_{fs} passa a assumir os valores calculados pela Equação 23, diminuindo o seu valor.

Assim, a redução do valor de h observada ao longo do tempo de secagem pode ser atribuída ao decréscimo do κ_{fs} e é diretamente influenciado pela redução da umidade no material.

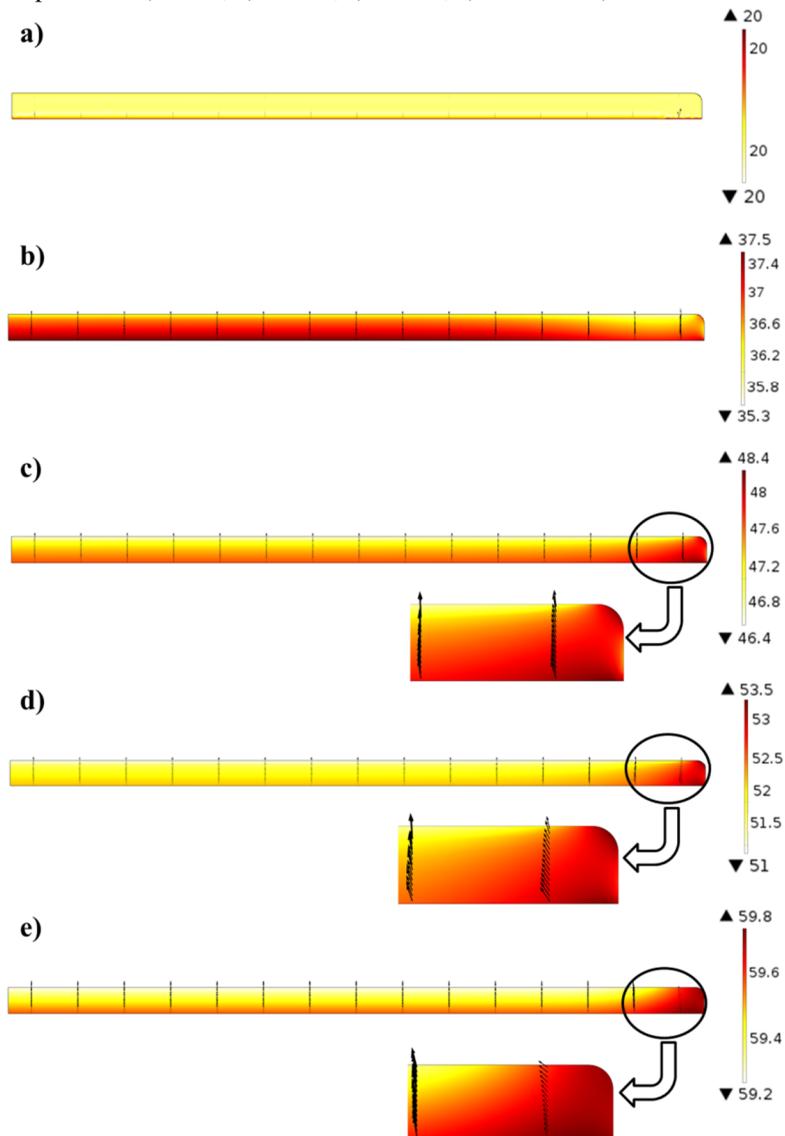
Os perfis de temperatura ao longo da espessura do domínio considerado podem ser observados, em diferentes tempos, nas Figuras 35-38.

Figura 35 - Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo da espessura da pasta de microalga para a condição de secagem de 50°C e 1 m s^{-1} em diferentes tempos do processo: a) 0 min, b) 25 min, c) 50 min, d) 100 min e e) 745 min



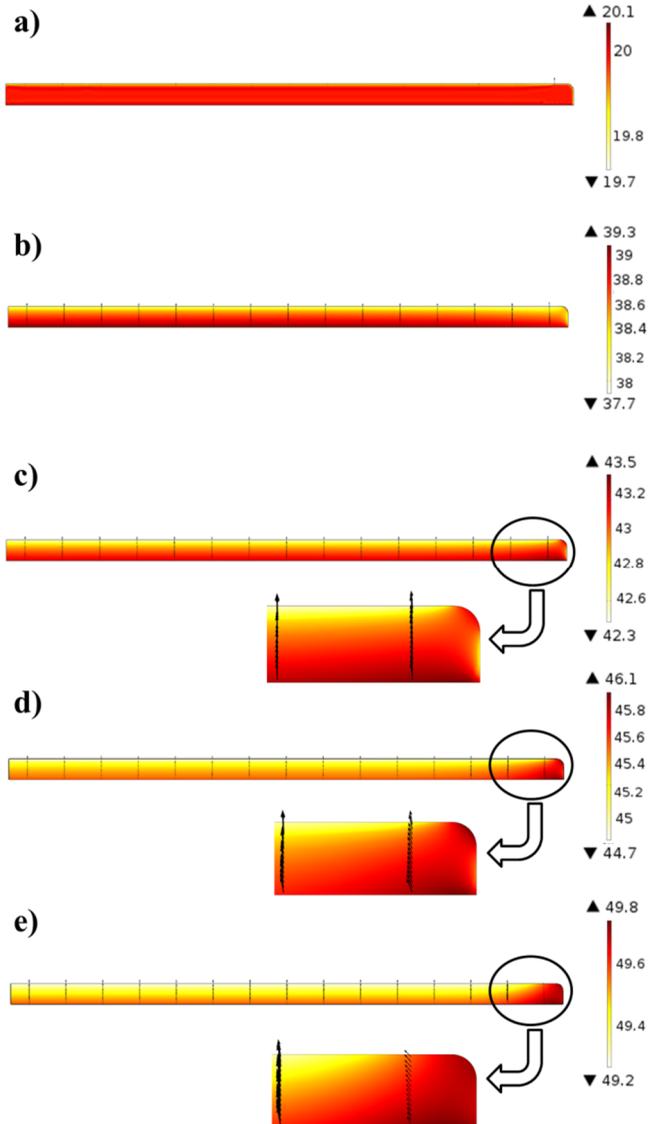
Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 36 - Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo da espessura da pasta de microalga para a condição de secagem de 60°C e 1 m s^{-1} em diferentes tempos do processo: a) 0 min, b) 25 min, c) 50 min, d) 100 min e e) 630 min



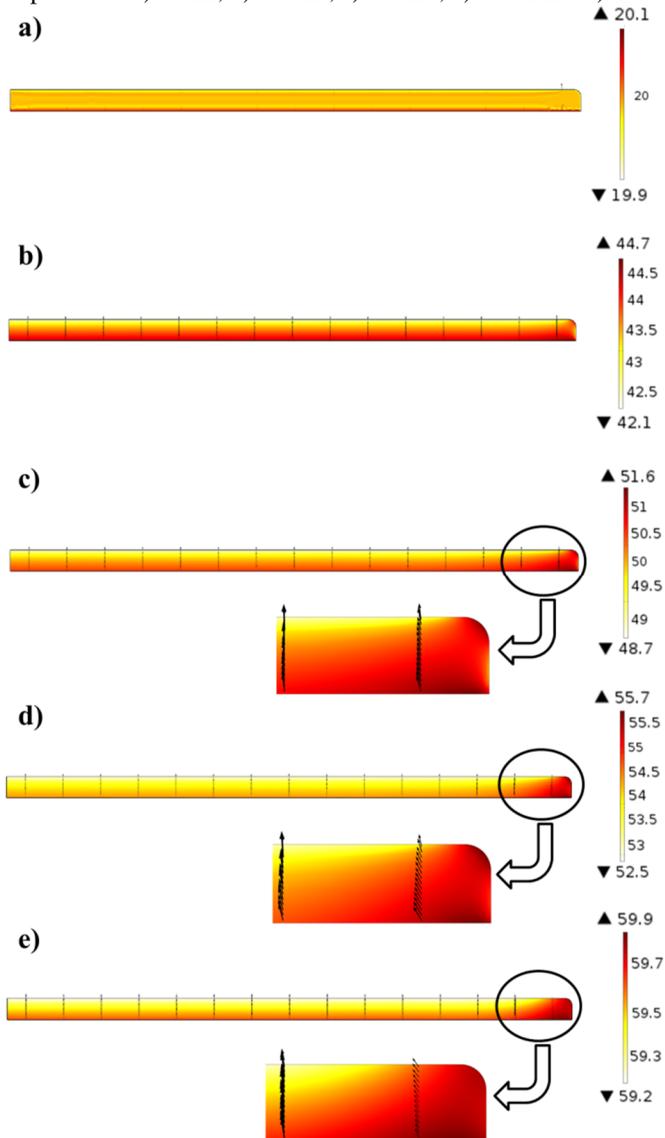
Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 37 - Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo da espessura da pasta de microalga para a condição de secagem de 50°C e 2 m s^{-1} em diferentes tempos do processo: a) 0 min, b) 25 min, c) 50 min, d) 100 min e e) 700 min



Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 38 - Perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo da espessura da pasta de microalga para a condição de secagem de 60°C e 2 m s^{-1} em diferentes tempos do processo: a) 0 min, b) 25 min, c) 50 min, d) 100 min e e) 450 min



Fonte: desenvolvido pelo autor

O padrão dos perfis de temperatura visualizado nas Figuras 35-38 é semelhante para todos os casos.

No início do processo (Figuras 35-38, letra a), a biomassa de microalga encontra-se a temperatura ambiente (20°C). Com a transferência de calor entre o ar aquecido e a biomassa, surgem pequenas diferenças de temperatura ao longo da espessura do domínio considerado. Para o tempo de 25 min, uma diferença de cerca de 2°C é observada para todos os casos. Para 50 e 100 min de processo, são observadas diferenças que variam de 1°C, para a condição operacional de 50°C e 1 m s⁻¹ e 3°C para 60°C e 2 m s⁻¹. Para os tempos finais de secagem, são observadas diferenças menores que 1°C ao longo da espessura do domínio, para os quatro casos.

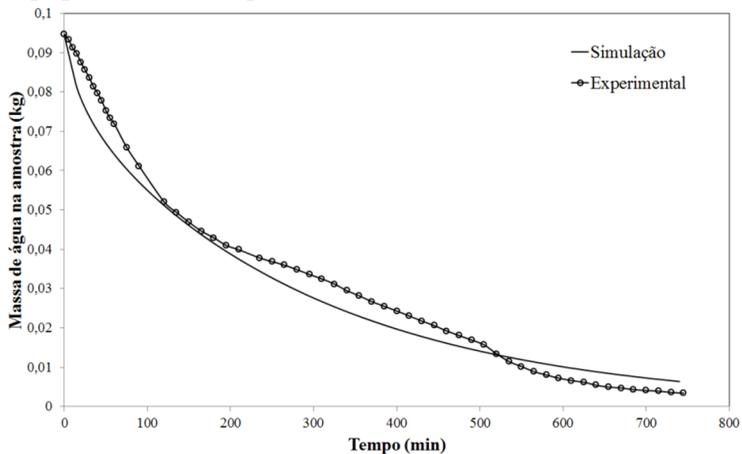
As pequenas diferenças de temperatura observadas são próprias do processo de secagem em camada delgada. Contribui ainda para isto a condição de contorno 26-c aplicada ao modelo de transferência de calor, que atribui a evaporação da água às bordas superior e lateral do domínio e justifica a menor temperatura evidenciada na extremidade superior. Na borda lateral, embora a mesma condição de contorno tenha sido aplicada, não foi observada a diminuição na temperatura, possivelmente porque a concentração de água nesta borda é menor, conforme pode ser observado nas Figuras 27-30.

A diferença de temperatura ao longo da espessura da pasta propicia o surgimento de um perfil de fluxo de calor indicado nas Figuras 35-38, através de setas. No início do processo, o fluxo de calor é apenas vertical, da superfície inferior para a superior. Depois de decorridos 100 minutos de processo, o fluxo de calor adquire o perfil apresentado e mantém-se com este comportamento até o final do processo.

4.2.3 Comparação entre os estudos experimental e computacional

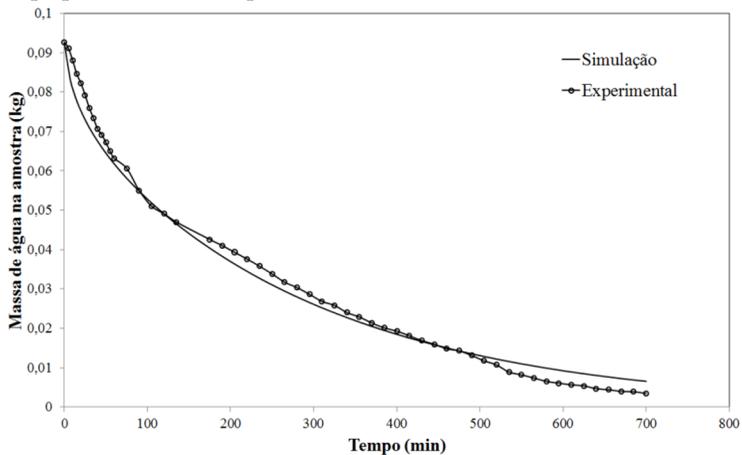
Nas Figuras 39-42 estão apresentados gráficos comparativos entre a massa de água evaporada em função do tempo para o estudo experimental e para o caso modelado matematicamente, para as condições testadas.

Figura 39 - Gráfico comparativo da massa de água evaporada em função do tempo para os estudos experimental e simulado, caso de 50°C e 1 m s⁻¹



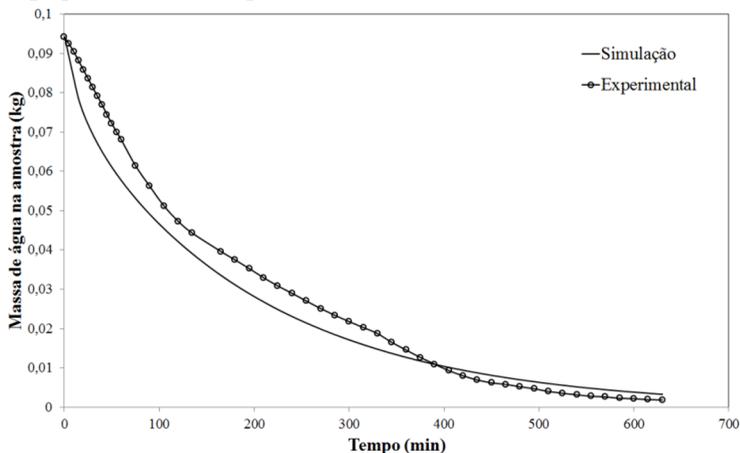
Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 40 - Gráfico comparativo da massa de água evaporada em função do tempo para os estudos experimental e simulado, caso de 50°C e 2 m s⁻¹



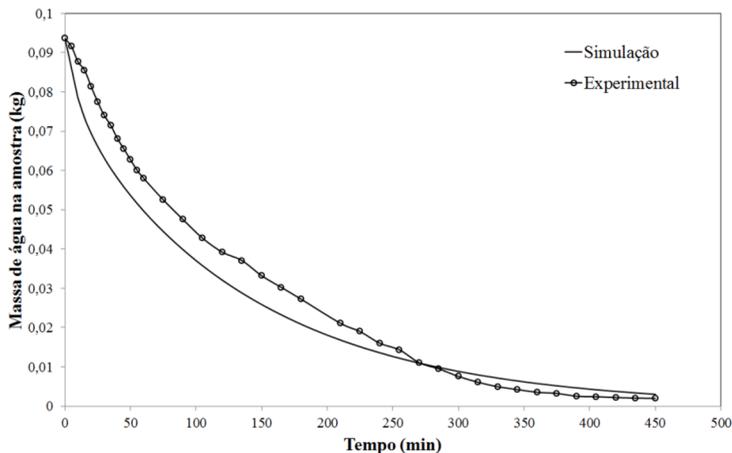
Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 41 - Gráfico comparativo da massa de água evaporada em função do tempo para os estudos experimental e simulado, caso de 60°C e 1 m s^{-1}



Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 42 - Gráfico comparativo da massa de água evaporada em função do tempo para os estudos experimental e simulado, caso de 60°C e 2 m s^{-1}



Fonte: desenvolvido pelo autor

Conforme pode ser observado, os resultados obtidos na simulação representam a tendência observada na secagem experimental. No entanto, o modelo desenvolvido falha ao descrever os diferentes períodos obtidos no estudo experimental, períodos estes correspondentes

à secagem à taxa constante e primeiro e segundo períodos de secagem à taxa decrescente. Esta falha ocorre ao se considerar unicamente o mecanismo difusivo de umidade que assume uma difusividade efetiva constante (D_{ef}), que não considera a variação deste parâmetro com a umidade da microalga e com sua temperatura ao longo do tempo.

O coeficiente de determinação (R^2) está apresentado na Tabela 21, para cada um dos casos analisados. O R^2 indica o quanto o modelo se aproxima dos valores experimentais.

Tabela 21 - Coeficiente de determinação para os casos avaliados na secagem em camada delgada

Parâmetros	Coefficiente de determinação (R^2)
50°C e 1 m s⁻¹	0,8293
50°C e 2 m s⁻¹	0,8619
60°C e 1 m s⁻¹	0,8157
60°C e 2 m s⁻¹	0,8153

Fonte: desenvolvido pelo autor

Os valores de coeficiente de determinação (R^2) ficaram todos acima de 0,8153, comprovando que o modelo simulado consegue descrever e reproduzir a tendência observada nos dados experimentais coletados na secagem da microalga.

4.3 SECAGEM EM LEITO DE JORRO

4.3.1 Caracterização dos materiais utilizados

4.3.1.1 Partículas inertes

A caracterização das partículas de EVA foi realizada seguindo a metodologia apresentada no item 3.3.2.1 e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Propriedades das partículas de EVA

Parâmetro	Valor
Diâmetro médio de partícula ($d_{p,EVA}$)	2,83 – 3,36 mm
Massa específica da partícula ($\rho_{p,EVA}$)	913,11 kg/m ³
Massa específica aparente ($\rho_{ap,EVA}$)	564,34 kg/m ³
Porosidade do leito (ϵ_{EVA})	0,41

Fonte: desenvolvido pelo autor

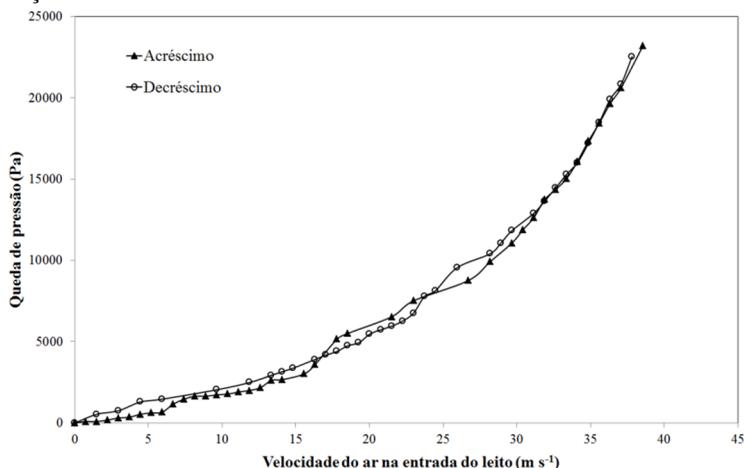
Mathur e Epstein (1974), em seu livro “Spouted Bed”, sugerem que, para que o regime de jorro seja praticado, a partícula de inerte precisa ter um diâmetro mínimo de cerca de 1 mm. Os mesmos autores relatam ainda estudos realizados por outros pesquisadores, que concluem que a partícula pode apresentar tamanho menor, desde que o diâmetro de entrada de ar na câmara de secagem não exceda 30 vezes o diâmetro da partícula. Com relação à uniformidade do tamanho das partículas, os autores afirmam que a estabilidade do jorro é favorecida utilizando-se partículas de tamanho semelhante.

Ciente destas considerações, a caracterização das partículas de EVA permite afirmar que as partículas utilizadas enquadram-se na classificação recomendada por Mathur e Epstein (1974).

4.3.2 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro

Inicialmente, avaliou-se a queda de pressão proporcionada somente pelo leito sem as partículas inertes (testes em branco). As curvas dos testes em branco considerando o acréscimo e o decréscimo de ar na entrada do leito de jorro são apresentadas na Figura 43.

Figura 43 - Queda de pressão no leito de jorro sem as partículas inertes em função da velocidade do ar na entrada do leito



Fonte: desenvolvido pelo autor

Para facilitar a aplicação das curvas da Figura 43, ajustou-se aos dados experimentais de acréscimo e decréscimo de ar um modelo sob a

forma de função potência e função exponencial, respectivamente. Os dados gerados a partir deste ajuste estão apresentados na Tabela 23.

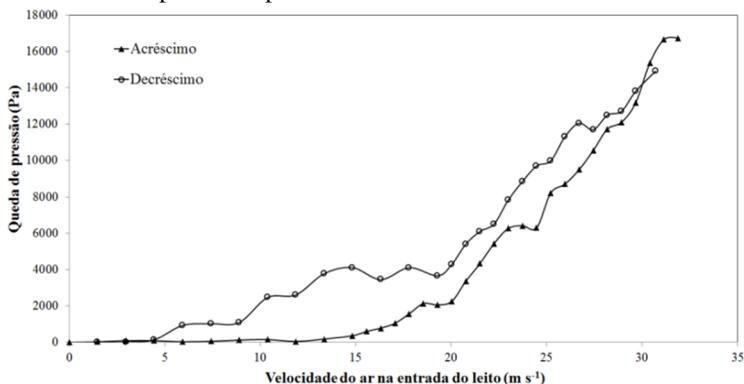
Tabela 23 - Dados obtidos no teste em branco

	Função Potência	R²	Equação
Acréscimo na velocidade do ar	$\Delta P = 55,35 \cdot v_{\text{ar}}^{1,5645}$	0,9782	(52)
Decréscimo na velocidade do ar	$\Delta P = 802,45 \cdot e^{0,0906 v_{\text{ar}}}$	0,9798	(53)

Fonte: desenvolvido pelo autor

Assim, determinaram-se as curvas fluidodinâmicas do leito de jorro na temperatura do ar de entrada de 60°C. Estas curvas estão apresentadas na Figura 44.

Figura 44 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar na entrada do leito para a temperatura de 60°C



Fonte: desenvolvido pelo autor

As curvas apresentadas na Figura 44 evidenciam que no sistema estudado o aumento da velocidade do ar na entrada do leito para valores além do aparecimento de jorro apresentam o aumento da queda de pressão. Este comportamento não se assemelha ao observado por grande parte das referências consultadas, que observam o pico na queda de pressão pouco antes do aparecimento do jorro, seguido pela redução na queda de pressão (Figura 8) (ALMEIDA, 2009; NASCIMENTO, 2013; OLIVEIRA, 2006).

No entanto, Nelson e Gay (1969) apud Mathur e Epstein (1974) observaram comportamento semelhante ao apresentado na Figura 44. Os

autores acreditam que a causa deste comportamento está na entrada do ar e não no leito de partículas.

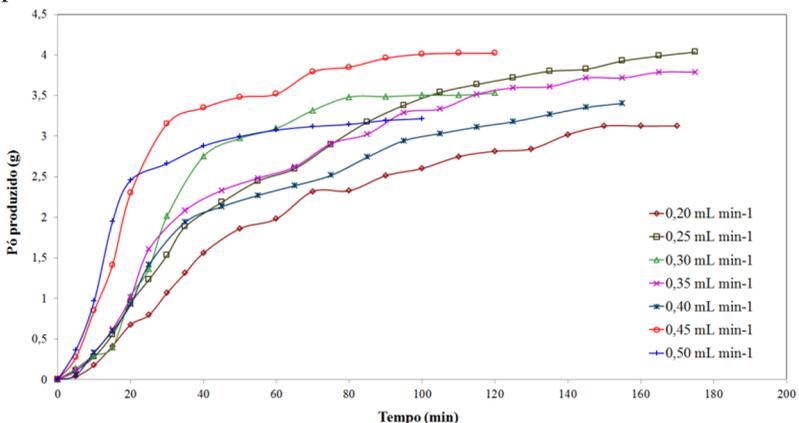
O bocal de entrada do ar na câmara de secagem contém uma placa de vidro perfurada, com o intuito de deixar o ar passar e reter as partículas de EVA utilizadas no leito. Acredita-se que esta placa perfurada seja a causa principal do comportamento observado na Figura 44. Possivelmente os furos, que não são perfeitamente uniformes, podem estar causando uma perda de carga elevada.

Desta forma, a determinação da v_{mj} foi feita visualmente, durante o decréscimo da velocidade do ar e corresponde ao valor de 27 m s^{-1} .

4.3.3 Análise do processo de secagem em leito de jorro

Um gráfico comparativo do acompanhamento de pó produzido ao longo do tempo é apresentado na Figura 45, para as vazões de alimentação de biomassa estudadas.

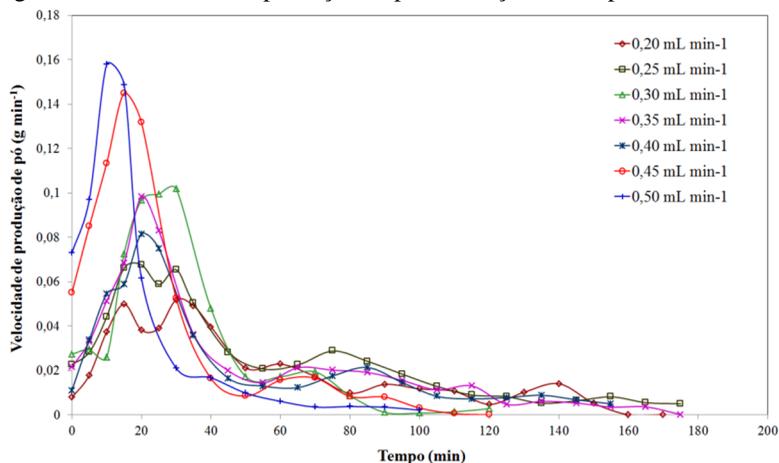
Figura 45 - Acompanhamento da massa de pó produzido ao longo do tempo, para todas as vazões estudadas



Fonte: desenvolvido pelo autor

De forma geral, percebe-se que a produção de pó foi mais intensa no início do processo, durante o período em que a biomassa estava sendo injetada na câmara de secagem. A velocidade de produção de pó, apresentada na Figura 46, evidencia o período em que a produção de pó foi mais intensa.

Figura 46 - Velocidade de produção de pó em função do tempo



Fonte: desenvolvido pelo autor

O processo com a menor vazão de alimentação ($0,20 \text{ mL min}^{-1}$) teve a produção de pó mais lenta dentre os casos estudados, com a taxa de produção máxima de $0,05187 \text{ g min}^{-1}$ aos 30 min de processo. Por outro lado, as curvas com as maiores vazões de alimentação, $0,45$ e $0,50 \text{ mL min}^{-1}$, apresentam produção de pó mais intenso nos primeiros 20 min de processo, com a taxa de produção máxima de $0,14497$ e $0,15791 \text{ g min}^{-1}$, respectivamente.

As alimentações de $0,25$, $0,30$, $0,35$ e $0,40 \text{ mL min}^{-1}$ apresentam taxa de produção de pó máxima de $0,0676$, $0,1017$, $0,09834$ e $0,08148 \text{ g min}^{-1}$ respectivamente.

Vale ressaltar que, para todas as vazões de alimentação da biomassa testadas, a taxa máxima de produção de pó foi atingida durante o período de injeção da pasta na câmara de secagem.

Na Tabela 24 é apresentado um resumo dos resultados obtidos nos experimentos de secagem da biomassa de microalga em leito de jorro. Nesta tabela estão apresentados a massa de pó produzido ao final do processo (g), a umidade do pó produzido (em base seca), o tempo total de processo e uma estimativa da produção de pó (g h^{-1}).

Tabela 24 - Resumo dos principais resultados obtidos nos experimentos de secagem em leito de jorro da microalga *Scenedesmus acuminatus*

Alimentação (mL min ⁻¹)	Massa de pó produzido (g)	Umidade do pó (% b.s.)	Tempo de secagem (min)	Produção (g h ⁻¹)
0,20	3,12	4,97	170	1,10
0,25	4,03	4,82	175	1,38
0,30	3,53	5,10	120	1,76
0,35	3,79	6,56	175	1,29
0,40	3,40	8,40	155	1,31
0,45	4,02	5,32	120	2,01
0,50	3,21	5,20	100	1,93

*b.s. – base seca

Fonte: desenvolvido pelo autor

A avaliação conjunta dos resultados apresentados na Tabela 24 e na Figura 45 destaca o experimento com alimentação de 0,45 mL min⁻¹ como o mais eficiente, pois teve a maior produção dentre todos os experimentos.

Vale ressaltar que a umidade do pó produzido por todos os experimentos encontra-se abaixo do limite de umidade comercial de 10 %, em base seca.

Os resultados obtidos para indicadores que avaliam o desempenho da secagem em leito de jorro estão apresentados na Tabela 25. São eles: percentual de recuperação do produto (R_P), eficiência na produção de pó (η_{pó}) e massa acumulada na câmara de secagem (m_{ac}).

Tabela 25 - Indicadores do desempenho dos experimentos de secagem em leito de jorro

Alimentação (mL min ⁻¹)	X _{bu,pó} (g g ⁻¹)	R _P (%)	η _{pó} (%)	m _{ac} (g)
0,20	0,0472	14,40	67,53	1,49
0,25	0,0459	18,68	87,59	0,57
0,30	0,0486	16,51	77,41	1,02
0,35	0,0616	17,11	80,21	0,91
0,40	0,0774	15,20	71,28	1,32
0,45	0,0505	18,49	86,69	0,61
0,50	0,0494	14,72	68,99	1,43

Fonte: desenvolvido pelo autor

Os dados apresentados na Tabela 25 destacam os experimentos com alimentação de 0,25 e 0,45 mL min⁻¹, visto seus elevados valores de R_p e $\eta_{p\acute{o}}$, e baixo valor de m_{ac} . No entanto, conforme apresentado na Tabela 24, o tempo de secagem do experimento com alimentação de 0,25 mL min⁻¹ foi cerca de 45 % maior que o tempo observado para a secagem com alimentação de 0,45 mL min⁻¹. Esse tempo extra envolve custos adicionais, que não são justificáveis pela pequena superioridade nos indicadores de desempenho apresentados pelo experimento com vazão de 0,25 mL min⁻¹.

Assim sendo, dentre as condições de alimentação da biomassa testadas, a vazão de 0,45 mL min⁻¹ representa a melhor alternativa.

É válido comentar que testes com alimentação contínua e maiores vazões de alimentação de biomassa não foram realizados por limitações do sistema de alimentação. As vazões testadas neste trabalho provavelmente não exploraram a capacidade máxima do secador desenvolvido.

4.3.4 Cálculo do diâmetro de partícula

Na Tabela 26 estão apresentadas as variáveis necessárias para o cálculo do diâmetro de corte do ciclone, juntamente com seus valores. Esta tabela apresenta ainda o valor calculado para o d_{pc} , através da Equação 52.

Tabela 26 - Variáveis utilizadas no cálculo do diâmetro de corte do ciclone

Variável	Valor	Referência
μ_{ar} (kg s m ⁻²)	$1,8 \times 10^{-6}$	Geankoplis, 1993
b (m)	0,025	Valor medido
Ne	5	Silva, 2006
v (m s ⁻¹)	12,43	Valor medido
$\rho_{p\acute{o}}$ (kg m ⁻³)	1.468,3	Equação 51
ρ_{ar} (kg m ⁻³)	1,2244	Geankoplis, 1993
d_{pc} (μ m)	0,841	Equação 50

Fonte: desenvolvido pelo autor

Em posse dos valores da eficiência na produção de pó, dada pela Equação 51, determinou-se a razão entre o diâmetro médio das partículas coletadas pelo ciclone e o diâmetro de corte do ciclone

$\left(\frac{d_{pó}}{d_{pc}} \right)$, com o auxílio da curva da Figura 20. Conhecendo o valor

desta razão e o valor do d_{pc} , determinou-se o diâmetro médio do pó produzido ($d_{pó}$).

Na Tabela 27 estão apresentados todos os valores utilizados para a determinação do $d_{pó}$, bem como o seu valor, calculado para cada uma das condições estudadas.

Tabela 27 - Determinação do diâmetro médio do pó produzido

Alimentação (mL min⁻¹)	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$\eta_{pó}$ (%)	67,53	87,59	77,41	80,21	71,28	86,70	68,99
$d_{pó}/d_{pc}$	1,45	2,65	1,80	2,00	1,55	2,60	1,50
$d_{pó}$ (µm)	1,22	2,23	1,51	1,68	1,30	2,18	1,26

Fonte: desenvolvido pelo autor

Os valores de diâmetro determinados através desta estimativa indicam que o processo de secagem em leito de jorro rompeu a parede celulósica das microalgas. Segundo Silva (1999), as células de *Scenedesmus acuminatus* são cenóbios retos a levemente curvos, com comprimento de 9-12 µm e largura de 1-2 µm.

O diâmetro médio do pó produzido pode ser afetado pelas condições de processo, tais como temperatura de secagem, vazão de alimentação da biomassa e velocidade de injeção do ar, tal qual observado por Cortés-Rojas, Souza e Oliveira (2014) ao analisarem o tamanho das partículas de pó coletadas pelo ciclone a partir de um processo de secagem em *spray dryer*. Segundo os autores, maiores vazões de alimentação da biomassa podem ser responsáveis pela obtenção de pó com diâmetro médio maior.

Contudo, não é observada uma relação direta entre o $d_{pó}$ e o aumento da vazão de alimentação da biomassa. Isso pode ser atribuído ao fato que os valores de $d_{pó}$ determinados correspondem a uma estimativa, uma vez que são baseados na eficiência calculada para cada processo, e não em medições.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA SECA

4.4.1 Análise do teor de proteínas e lipídeos

A composição bioquímica da microalga é significativamente afetada pela técnica de preservação a que é submetida (ZEPKA et al., 2008). Na Tabela 28 são apresentados os resultados obtidos para o teor de proteína e lipídeos para a microalga *Scenedesmus acuminatus* seca pelas técnicas de secagem em camada delgada e em leito de jorro. Vale lembrar que foi analisado o produto da secagem em camada delgada na condição de 60°C e 2 m s⁻¹ e que, para o caso do leito em jorro, a amostra analisada corresponde a uma mistura dos produtos da secagem para os casos de alimentação de 0,2, 0,35, 0,25 e 0,40 mL min⁻¹.

Tabela 28 - Teor de lipídeos e proteína para o produto da secagem em camada delgada e em leito de jorro

	Secagem em camada delgada	Secagem em leito de jorro
Proteína (%)	31,2	27,0
Lipídeos (%)	2,3	7,3

Fonte: desenvolvido pelo autor

Os resultados obtidos, ainda que preliminares, indicam que a técnica de secagem influencia na composição bioquímica da microalga. Para maior segurança nesta afirmação, um estudo mais aprofundado é necessário, com as análises sendo realizadas em triplicata e utilizando a biomassa seca com o mesmo tamanho de partícula. O fato da biomassa seca em camada delgada estar em forma de placas pode ter dificultado a extração de lipídeos e ter contribuído para baixo valor observado (2,3%).

Na literatura, são encontrados diversos trabalhos que estudaram a composição bioquímica de microalgas e que estão apresentados na sequência. No entanto, a comparação torna-se difícil, uma vez que não foram encontrados trabalhos que tivessem utilizado a mesma espécie utilizada neste estudo e ainda devido ao fato de que a composição das microalgas varia com as condições de cultivo empregadas.

Langdon e Onal (1999) secaram diversas espécies de microalga através da técnica de *spray drying* e encontraram os seguintes valores para teor de proteína: 23 % (*Chaetoceros calcitrans*), 60 % (*Spirulina platensis*) e 25 % (*Haematococcus pluvialis*).

Jiménez et al. (2003), testaram o conteúdo de proteína da microalga *Spirulina platensis* seca pelo método de *spray drying* e obtiveram 47 % como resultado.

Zepka et al. (2008), ao secarem a microalga *Aphanothece Nægeli*, em um secador convectivo de bandeja, com fluxo de ar paralelo de $1,5 \text{ m s}^{-1}$, temperaturas de 40, 50 e 60°C e espessuras de 5 e 7 mm, obtiveram valores de teor de proteína que variaram entre 41,3 e 49,30 %, em base seca.

Oliveira et al. (2009), ao secarem *Spirulina platensis* utilizando fluxo de ar perpendicular, obtiveram um valor de proteína de 64 %, em base úmida, para o experimento a temperatura de 60°C .

Com relação ao teor de lipídios, o valor observado para o produto da secagem em leito de jorro foi similar ao reportado por Esquivel, Lobina e Sandoval (1993), que, ao secarem *Phaeodactylum tricornutum* em uma estufa convencional a 30°C , observaram um valor de 7,7 %, em base seca.

Zepka et al. (2008), ao secarem a microalga *Aphanothece Nægeli*, em um secador convectivo de bandeja, com fluxo de ar paralelo de $1,5 \text{ m s}^{-1}$, temperaturas de 40, 50 e 60°C e espessuras de 5 e 7 mm, obtiveram valores para o teor de lipídios que variaram entre 7,15 e 7,90 %, em base seca.

Oliveira et al. (2009), ao secarem *Spirulina platensis* utilizando fluxo de ar perpendicular, obtiveram um valor de lipídio de 8,6 %, em base úmida, para o experimento a temperatura de 60°C .

4.4.2 Teste de reidratação

As características de reidratação de um produto seco são amplamente utilizadas como um índice de qualidade. As Figura 47 e Figura 48 apresentam imagens dos testes qualitativos de reidratação realizados.

Na Figura 47 podem-se observar as imagens dos testes realizados para as quatro condições operacionais empregadas na secagem em camada delgada, após uma hora de agitação, seguida de 1, 3 e 24 horas de repouso. Já na Figura 48, estão apresentadas as imagens dos testes realizados para o produto obtido pelas sete condições variadas na secagem em leito de jorro, também após uma hora de agitação, seguida de 1, 3 e 24 horas de repouso.

A reidratação do produto obtido pela secagem em leito de jorro pode ser considerada mais eficaz, uma vez que o aspecto pastoso foi restabelecido. Por outro lado, a reidratação da biomassa seca em camada

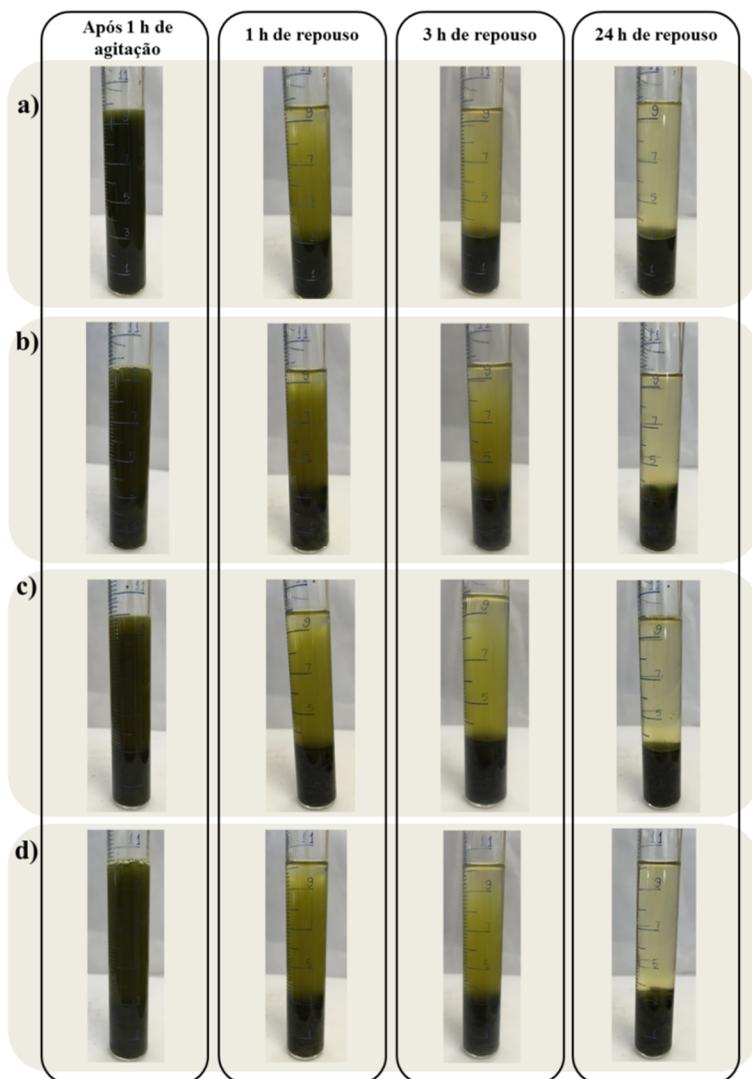
delgada apresentou grumos residuais, indicando maior dificuldade na reincorporação de água pelas células.

O produto da secagem em camada delgada estava na forma de placas, enquanto que a biomassa seca em leito de jorro estava na forma de pó. A menor área de exposição das placas pode ter dificultado a reidratação. Fato semelhante foi observado por Martins e Pinto (2003), que estudaram a cinética de reidratação de cebola seca em camada delgada com escoamento perpendicular de ar com velocidade de $1,5 \text{ m s}^{-1}$ e temperatura de 60°C . Os autores testaram amostras da cebola nas formas picada e em pó e concluíram que a reidratação foi mais rápida para o produto em pó, devido à maior área de exposição.

A comparação entre as variações dentro da mesma técnica de secagem não permitem afirmar se há alguma diferença na reidratação do produto seco por diferentes condições. Ou seja, não há diferenças visuais entre o teste de reidratação realizado para o produto seco em secador convectivo a 50 ou 60°C . O mesmo é observado para o teste de reidratação aplicado ao produto obtido pelas diferentes vazões da secagem em leito de jorro.

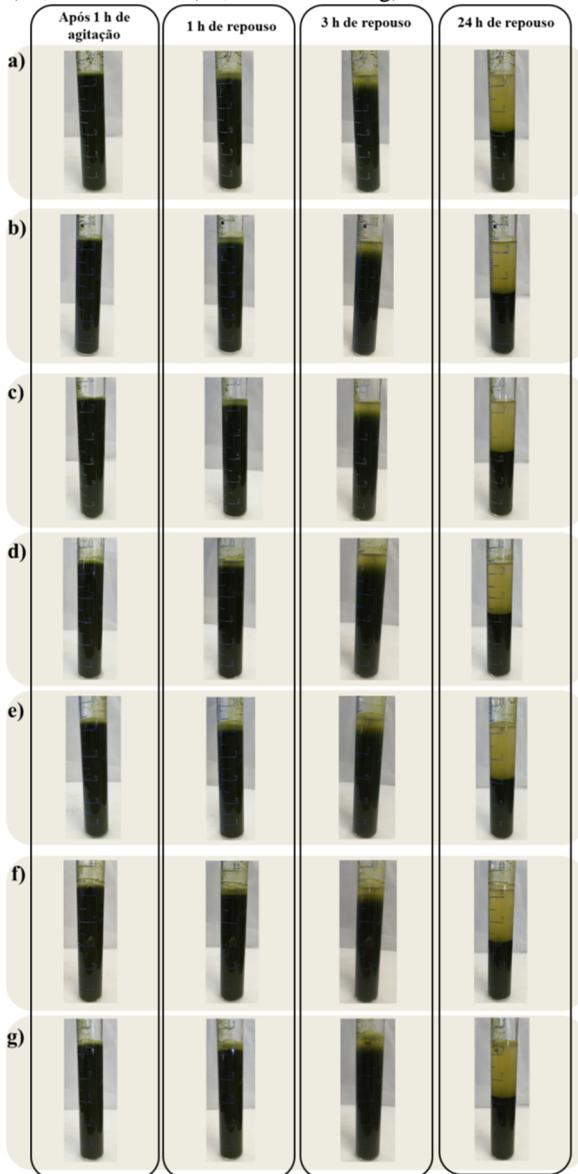
A decantação do produto reidratado é evidenciada durante o período de repouso. Para os testes apresentados na Figura 48, que corresponde à reidratação do produto da secagem em leito de jorro, a decantação é mais lenta, o que pode ser considerado um indicativo da melhor reidratação da biomassa.

Figura 47 - Teste de reidratação para a microalga seca por secagem em camada delgada: a) 50°C e 1 m s⁻¹, b) 50°C e 2 m s⁻¹, c) 60°C e 1 m s⁻¹ e d) 60°C e 2 m s⁻¹



Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 48 - Teste de reidratação para a microalga seca por secagem em leito de jorro: a) $0,20 \text{ mL min}^{-1}$, b) $0,25 \text{ mL min}^{-1}$, c) $0,30 \text{ mL min}^{-1}$, d) $0,35 \text{ mL min}^{-1}$, e) $0,40 \text{ mL min}^{-1}$, f) $0,45 \text{ mL min}^{-1}$ e g) $0,50 \text{ mL min}^{-1}$



Fonte: desenvolvido pelo autor

5 CONCLUSÃO

Com base nos objetivos propostos e diante dos resultados obtidos, são apresentadas neste capítulo as principais conclusões deste trabalho.

A secagem da *Scenedesmus acuminatus* em camada delgada, com escoamento paralelo de ar, tendo como fatores de estudo a temperatura e a velocidade do ar, ocorreu principalmente durante o período de secagem à taxa decrescente. Em relação às condições de processo testadas, o processo à temperatura de 60°C e velocidade de ar de 2 m s⁻¹ ocorreu no menor tempo, com os maiores valores de constante de secagem e difusividade efetiva. Uma redução de aproximadamente 40 % no tempo de secagem entre os dois casos extremos estudados foi observada.

Os valores observados para difusividade efetiva (D_{ef}) variaram de $1,53 \times 10^{-10}$ até $5,41 \times 10^{-10}$ m² s⁻¹ e estão em concordância com a literatura consultada. Ainda sobre os valores de D_{ef} , dentro do intervalo estudado, percebeu-se que são mais sensíveis à alterações de temperatura do que da velocidade do ar de secagem.

A modelagem fenomenológica e simulação realizada para a secagem da *Scenedesmus acuminatus* em camada delgada reproduziu de forma satisfatória o comportamento observado no estudo experimental. Além disso, o estudo computacional permitiu a representação dos perfis de umidade e temperatura ao longo do tempo, para o domínio considerado.

Os perfis de umidade evidenciaram suaves diferenças na concentração de água ao longo da espessura do domínio, desde o início até o final do processo. Os perfis de temperatura permitiram a visualização detalhada do processo de aquecimento da pasta ao longo do tempo e ao longo da espessura. A temperatura foi praticamente uniforme em toda a camada, com diferenças não superiores a 3°C.

O secador em leito de jorro desenvolvido para a secagem da biomassa da microalga da *Scenedesmus acuminatus* apresentou comportamento fluidodinâmico diferente do observado por grande parte da literatura consultada. Para o sistema em estudo, o aumento da velocidade do ar para valores além do aparecimento de jorro apresentaram o aumento da queda de pressão.

As curvas de produção de pó em função do tempo e sua derivada mostraram que a produção de pó foi mais intensa durante a injeção da biomassa na câmara de secagem. Em relação às diferentes vazões de alimentação da pasta testadas, o processo com a maior vazão de alimentação teve a produção de pó mais intensa.

Os indicadores do desempenho do processo destacaram os experimentos com alimentação de 0,25 e 0,45 mL min⁻¹, visto seus elevados valores de percentual de recuperação de produto (R_p) e eficiência na produção de pó ($\eta_{p\acute{o}}$), e baixo valor de massa acumulada na câmara de secagem (m_{ac}). No entanto, o tempo de secagem do experimento com alimentação de 0,25 mL min⁻¹ foi cerca de 45 % maior que o tempo observado para a secagem com alimentação de 0,45 mL min⁻¹. Assim sendo, dentre as condições de alimentação da biomassa testadas, a vazão de 0,45 mL min⁻¹ representa a melhor alternativa, com produção de cerca de 2 gramas de pó a cada hora de processo, contra 1,4 gramas de pó para a vazão de 0,25 mL min⁻¹.

Ainda sobre o processo de secagem em leito de jorro, estimou-se o diâmetro médio do pó seco produzido (d_{pó}). Não foi observada uma relação direta entre o d_{pó} e a alimentação da biomassa e, considerando todos os experimentos realizados, o d_{pó} apresentou valor médio de 1,63 µm. Os valores observados para o d_{pó} indicam que a parede celular das microalgas foi rompida durante o processo de secagem em leito de jorro.

Os testes de teor de proteína e lipídios realizados com a biomassa seca indicaram que a técnica de secagem influencia na composição bioquímica da microalga. Para a biomassa seca em camada delgada obteve-se maior teor de proteínas (31,2 %) e um valor bastante baixo de lipídios (2,3 %). Para a secagem em leito de jorro, obteve-se um valor um pouco menor para proteína (27 %) e maior para o teor de lipídios (7,3 %). Um estudo mais aprofundado é necessário a fim de proporcionar maior segurança nos resultados.

Os testes de reidratação realizados tiveram caráter apenas qualitativo e mostraram que a reidratação da biomassa seca em leito de jorro foi mais eficaz, uma vez que a decantação da mesma se deu mais lentamente do que aquela observada para o caso da secagem em camada delgada. Para este último caso, grumos residuais puderam ser observados após a reidratação, indicando maior dificuldade na reincorporação de água pelas células.

Por fim, a partir da análise das duas técnicas estudadas neste trabalho e dos produtos obtidos por cada uma, conclui-se que o secador em leito de jorro é mais vantajoso para a secagem das microalgas *Scenedesmus acuminatus*. As características físicas do produto, a melhor conservação do teor de lipídios e a possibilidade da pronta incorporação da biomassa seca na formulação de alimentos, fármacos e cosméticos, atestam a qualidade do produto obtido pela secagem em leito de jorro. Além disso, espera-se que o consumo energético do leito de jorro seja

menor, uma vez que os coeficientes de transferência de calor e de massa são, como se sabe, sensivelmente maiores para este caso.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de complementar este trabalho, são dadas as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Incluir o encolhimento no estudo dos modelos de difusão;
- Testar diferentes condições operacionais no processo de secagem da microalga *Scenedesmus acuminatus* em leito de jorro;
- Realizar testes de secagem da *Scenedesmus acuminatus* em leito de jorro com alimentação contínua;
- Avaliar a qualidade do produto desidratado por testes de reidratação quantitativos;
- Realizar a modelagem fenomenológica e simulação do processo de secagem da *Scenedesmus acuminatus* em leito de jorro;
- Realizar o levantamento de custos no processo de secagem da microalga *Scenedesmus acuminatus*;
- Estudo de otimização das dimensões e condições operacionais do secador de leito de jorro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEODATO, M.G. **Análise da Fluidodinâmica de leite de jorro durante o recobrimento de partículas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, 2003.

ALMEIDA, A.R.F. **Análise da secagem de pastas em leite de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, 2009.

APRAJEETA, J.; GOPIRAJAH, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. **Journal of Food Engineering**, v. 144, p. 119–128, 2015.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., **Handbook Fundamentals**, 2009.

AZEREDO, V.B.S. **Produção de biodiesel a partir do cultivo de microalgas: Estimativa de custos e perspectiva de custos para o Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

AZIZ, M.; ODA, T.; KASHIWAGI, T. Integration of energy-efficient drying in microalgae utilization based on enhanced process integration. **Energy**, v. 70, p. 307–316, 2014.

BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 449–458, 2004.

BAGCHI, S.K.; RAO, P.S.; MALLICK, N. Development of an oven drying protocol to improve biodiesel production for an indigenous chlorophycean microalga *Scenedesmus sp.* **Bioresource Technology**, v. 180, p. 207–213, 2015.

BARROS, A.I. et al. Harvesting techniques applied to microalgae : A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1489–1500, 2015.

BILLER, P.; ROSS, A.B. Pyrolysis GC–MS as a novel analysis technique to determine the biochemical composition of microalgae. **Algal Research**, v. 6, p. 91–97, 2014.

BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Transport phenomena**. New York: John Wiley & Sons, Inc., p. 920, 2002.

BITTI, M. T. **Avaliação das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, 2012.

BRENNAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae - a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 557–577, 2010.

BRINK, J.; MARX, S. Harvesting of Hartbeespoort Dam micro-algal biomass through sand filtration and solar drying. **Fuel**, v. 106, p. 67–71, 2013.

CAMPOS, V.B.; BARBARINO, E.; LOURENÇO, S.D.O. Crescimento e composição química de dez espécies de microalgas marinhas em cultivos estanques. **Ciência Rural**, v. 40, p. 339–347, 2010.

CARDOSO, A.S. et al. O uso de microalgas para a obtenção de biocombustíveis. **Revista Brasileira de Biociência**, v. 9, p. 542–549, 2011.

CHAPRA, S.C.; CANALE, R.P. **Métodos numéricos para ingenieros**. 5th ed. [s.l.]: McGraw-Hill, p. 1001, 2007.

COMSOL. **COMSOL Multiphysics® reference guide**. 2015.

CRUZ, R.V.A. **Estudo da utilização de microalgas e cianobactérias para a captura de dióxido de carbono e produção de matérias-primas de interesse industrial**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo, 2011.

DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes - A review. **Applied Energy**, v. 131, p. 323–344, 2014.

DERNER, R.B. et al. Microalgas, produtos e aplicações. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1959–1967, 2006.

DESMORIEUX, H.; DECAEN, N. Convective drying of spirulina in thin layer. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 497–503, 2005.

DHATT, G.; TOUZOT, G.; LEFRANÇOIS, E. **Finite Element Method**. Hoboken: Joh Wiley & Sons, 2012.

DICKINSON, E.J.F.; EKSTRÖM, H.; FONTES, E. COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review. **Electrochemistry Communications**, v. 40, p. 71–74, 2014.

DISSA, A.O. et al. Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of *Spirulina*. **Journal of Chemical Education**, v. 97, n. 3, p. 410–418, 2010.

DITCHFIELD, C. **Estudos dos métodos para a medida da atividade de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo, 2000.

DOTTO, G.L. et al. Influence of Drying Techniques on the Characteristics of Chitosan and the Quality of Biopolymer Films. **Drying Technology**, v. 29, n. 15, p. 1784–1791, 2011.

DOYMAZ, İ. An Experimental Study on Drying of Green Apples. **Drying Technology**, v. 27, p. 478–485, 2009.

DUARTE, J. H. et al. Avaliação da cinética de secagem e reidratação da microalga *Spirulina platensis*. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2009, Uberlândia. **Anais eletrônicos...** Uberlândia: [S.N.], 2009.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 50, p. 441–464, 2010.

ESQUIVEL, B.C.; LOBINA, D.V.; SANDOVAL, F.C. The biochemical composition of two diatoms after different preservation

techniques. **Comparative Biochemistry and Physiology - B Biochemistry and Molecular Biology**, v. 105, n. 2, p. 369–373, 1993.

QUEIROZ FILHO, A.V. **Análise do recobrimento de comprimidos em leito de jorro bidimensional para três posições de atomização de suspensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, 1997.

FOUST, A.S. et al. **Princípios de Operações Unitárias**. New York: John Wiley & Sons, p. 970, 1980.

GEANKOPLIS, C.J. **Transport processes and unit operations**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall Int., 921 p., 1993.

GULDHE, A. et al. Efficacy of drying and cell disruption techniques on lipid recovery from microalgae for biodiesel production. **Fuel**, v. 128, p. 46–52, 2014.

GUPTA, S.; COX, S.; ABU-GHANNAM, N. Effect of different drying temperatures on the moisture and phytochemical constituents of edible Irish brown seaweed. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, n. 5, p. 1266–1272, 2011.

HASSINI, L. et al. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 67, p. 457–465, 2015.

HUTTON, D. V. **Fundamentals of finite element analysis**. New York: McGraw Hill, p. 500, 2004.

JIMÉNEZ, C. et al. The feasibility of industrial production of *Spirulina* (*Arthrospira*) in Southern Spain. **Aquaculture**, v. 217, p. 179–190, 2003.

KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. Sydney: Pergamon Press, 1972.

KROKIDA, M.K.; MAROULIS, Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15, n. 10, p. 2441–2458, 1997.

LANGDON, C.; ONAL, E. Replacement of living microalgae with spray-dried diet for the marine mussel *Mytilus galloprovincialis*. **Aquaculture**, v. 180, p. 283–294, 1999.

LIRA, R. et al. As microalgas como alternativa à produção de biocombustíveis. **REVENG**, v. 20, n. 5, p. 389–403, 2012.

LIU, J. et al. Determination of ash content and concomitant acquisition of cell compositions in microalgae via thermogravimetric (TG) analysis. **Algal Research**, v. 12, p. 149–155, 2015.

LOPES, E. J. et al. Secagem da microalga *Aphanothece microscopica Nægeli* em leito de jorro. **Alimentos e Nutrição**. Araraquara, 2006. Disponível em:
<<http://200.145.71.150/seer/index.php/alimentos/article/viewArticle/294>>

_____. Characteristics of thin-layer drying of the cyanobacterium *Aphanothece microscopica Nægeli*. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 46, p. 63–69, 2007.

LUIZ, M.R. **Estudo teórico e experimental de secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum*)**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba, 2012.

MALAFRONTTE, L. et al. Combined convective and microwave assisted drying: Experiments and modeling. **Journal of Food Engineering**, v. 112, n. 4, p. 304–312, 2012.

MARRETO, R.N. **Estudo da técnica de leito de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina**. Tese (Doutorado em Ciências Farmacêuticas). Universidade de São Paulo, 2006.

MARTINS, P.C.; PINTO, L.A.A. Caracterização da Secagem de Cebola (*Allium cepa L.*) em Camada Delgada e da Reidratação do Produto Desidratado. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 6, p. 143–151, 2003.

- MASSART, A. et al. Experimental characterization and numerical simulation of the hydrodynamics in an airlift photobioreactor for microalgae cultures. **Algal Research**, v. 6, p. 210–217, 2014.
- MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 217–232, 2010.
- MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974.
- MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5th ed. [s.l.]: McGraw Hill, p. 1130, 1993.
- MEDEIROS, M.F.D. et al. Escoabilidade de leitos de partículas inertes com polpa de frutas tropicais. Efeitos na secagem em leito de jorro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1985, p. 475–480, 2001.
- _____. Drying of pastes in spouted beds: influence of the paste composition on the material retention in the bed. In: SILVA, M.A.; ROCHA, S.C.S. **Drying**, v. C. São Paulo, 2004. p. 1529-1536.
- MOSTAFA, S.S.M. Microalgal Biotechnology: Prospects and Applications. In: DHAL, N. K.; SAHU, S.C. **Plant Science**. [s.l.]: InTech, 2012. cap. 12.
- MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 4th ed. New York: CRC Press, p. 1334, 2015.
- MULET, A. et al. Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). **Journal of Food Engineering**, v. 53, p. 75–81, 2002.
- NASCIMENTO, B.S. **Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leito de jorro**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, 2013.
- OLIVEIRA, E.G. **Secagem de *Spirulina platensis*: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Química). Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2006.

_____ et al. Characterization of thin layer drying of *Spirulina platensis* utilizing perpendicular air flow. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 3, p. 1297–1303, 2009.

PALLAI-VARSÁNYI, E.; TÓTH, J.; GYENIS, J. Drying of suspensions and solutions on inert particle surface in mechanically spouted bed dryer. **China Particuology**, v. 5, p. 337–344, 2007.

PARK, K.J. et al. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem. Centro de Tecnologia e Engenharia de Alimentos**, Campinas, 2007. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>

PERRY, R.; GREEN, D. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7th ed. New York: McGraw-Hill, p. 2582, 1999.

PERUSSELLO, C. A. **Análise numérica e experimental da secagem osmo-convectiva do Yacon (*Smallanthus sonchifolius*)**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal do Paraná, 2013.

_____ et al. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). **Applied Thermal Engineering**, v. 63, n. 1, p. 23–32, 2014.

POLING, B.E.; PRAUSNITZ, J.M.; O'CONNEL, J.P. **The Properties of Gases and Liquids**. McGraw Hill: New York, 2001.

RAO, M. A. et al. **Engineering Properties of Foods**. 4th ed. New York: CRC Press, 2014.

RASHID, N. et al. Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 760–778, 2014.

RAWAT, I. et al. Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. **Applied Energy**, v. 103, p. 444–467, 2013.

RICHMOND, A. Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Iowa: Blackwekk Science Ltda, 2004.

ROSA, J.M.C. Modelação e Optimização de uma Unidade de Produção de Microalgas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade de Coimbra, 2011.

SABAREZ, H.T. Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 2, p. 279–288, 2012.

SANTOS, R.M. Estudo da secagem e do consumo de gás natural em uma rama têxtil de aquecimento direto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

SAYMA, A. Computational fluid dynamics. [s.l.]: Abdulnaser Sayma & Ventus Publishing ApS, 2009.

SEIIEDLOU, S. et al. Convective drying of apple: Mathematical modeling and determination of some quality parameters. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 12, p. 171–178, 2010.

SHOW, K.Y.; LEE, D.J.; CHANG, J.S. Algal biomass dehydration. **Bioresource Technology**, v. 135, p. 720–729, 2013.

SILVA, E.F.M. Modelos empíricos e difusivos para a descrição da secagem de bananas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

SILVA, M.K. Estudo de modelagem numérica tridimensional de ciclones do tipo Lapple para separação gás-sólido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

SPOLAORE, P. et al. Commercial Applications of Microalgae. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 101, n. 2, p.87-96, 2006.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. Drying: principles, applications and design. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers. 1986.

SUALI, E.; SARBATLY, R. Conversion of microalgae to biofuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4316–4342, 2012.

THEODORE, L.; PAOLA, V. Predicting Cyclone Efficiency. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 30, n. 10, p. 1132–1133, 1980.

TONON, T. et al. Long chain polyunsaturated fatty acid production and partitioning to triacylglycerols in four microalgae. **Phytochemistry**, v. 61, p. 15–24, 2002.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 3rd ed. São Paulo: Blücher, 1993.

VELÁZQUEZ-GUTIÉRREZ, S.K. et al. Sorption isotherms, thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (*Salvia hispanica L.*). **Carbohydrate Polymers**, v. 121, p. 411–419, 2015.

VELIĆ, D. et al. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. **Journal of Food Engineering**, v. 64, p. 97–102, 2004.

VERSTEEG, H.K. MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2st ed. Harlow: Pearson Education Limited, p. 517, 2007.

VISWANATHAN, T. et al. Effect of cell rupturing methods on the drying characteristics and lipid compositions of microalgae. **Bioresource Technology**, v. 126, p. 131–136, 2012.

VOLTOLINA, D.; SÁNCHEZ-SAAVEDRA, M.; TORRES-RODRÍGUEZ, L.M. Outdoor mass microalgae production in Bahia Kino, Sonora, NW Mexico. **Aquacultural Engineering**, v. 38, p. 93–96, 2008.

WANG, X. et al. The Application of COMSOL Multiphysics in Direct Current Method Forward Modeling. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 3, p. 266–272, 2011.

WELTY, J.R. et al. **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., p. 729, 2008.

WENDT, J.F. **Computational fluid dynamics: An Introduction**. New York: Editora Springer, p. 298, 1992.

WILLIAMS-GARDNER, A. **Industrial drying**. London: Leonard Hill, 1971.

XU, L. et al. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: Energy balance analysis. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 8, p. 5113–5122, 2011.

ZEPKA, L.Q. et al. Production and biochemical profile of the microalgae *Aphanothece microscopica Nægeli* submitted to different drying conditions. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, p. 1311–1316, 2008.