

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

Seldis Fernando dos Santos Júnior

**SECAGEM DE MICROALGAS *Scenedesmus acuminatus* EM  
LEITO DE JORRO: ESTUDO EXPERIMENTAL E DE  
MODELAGEM**

FLORIANÓPOLIS  
2016



Seldis Fernando dos Santos Júnior

**SECAGEM DE MICROALGAS *Scenedesmus acuminatus* EM  
LEITO DE JORRO: ESTUDO EXPERIMENTAL E DE  
MODELAGEM**

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  
2016

Secagem de Microalgas *Scenedesmus acuminatus* em Leito de Jorro: Estudo Experimental e de Modelagem

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

Santos Júnior, Seldis Fernando

Secagem de Microalgas *Scenedesmus acuminatus* em Leito de Jorro: Estudo Experimental e de Modelagem ; orientador, Marinho Bastos Quadri. - Florianópolis, SC, 2016.

137 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui referências

1. Engenharia Química. 2. Secagem. 3. Leito de jorro. 4. Estudo experimental e modelagem. I. Bastos Quadri, Marinho. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE MODELAGEM DA  
SECAGEM DE BIOMASSA DE MICROALGAS EM LEITO DE  
JORRO**

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

Florianópolis, 05 de outubro de 2016.

---

Profa. Dra. Cintia Soares  
Coordenador do PPGENQ

---

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

**Banca Examinadora:**

---

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

---

Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi  
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



Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, mas nunca pare no meio do caminho.





## AGRADECIMENTOS

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 Sistemas Poroso (LASIPO-UFSC) por toda estrutura oferecida para que o trabalho pudesse ser concluído da melhor maneira, com todo suporte necessário.

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 prof. Dr. Marinho Bastos Quadri, por todo o conhecimento compartilhado, pela oportunidade e confiança.

Ao CNPQ pela bolsa de estudos.

A todos os meus amigos e amigas, por sempre me incentivarem e acreditarem sempre no meu potencial, pela lealdade e por estarem sempre presentes em todos os momentos de minha vida.

A Iris, minha namorada, pelo apoio, carinho, preocupação, cobrança, amor e, principalmente, pela compreensão sempre presentes.

Aos meus colegas do LASIPO, Taysnara, Camila, Deise, Ianto, Fábio, Valdir, Stéphanie, Rafael, Rodrigo, Vivian, Marcelo e Louise, e aos meus amigos José Luiz e Marcos Antônio pelo carinho, amizade, compartilhamento de experiências e momentos de conversas que tornaram os dias muito mais fáceis. O convívio com cada um de vocês tornou este período marcante e enriquecedor.

Aos meus amados pais, Seldis e Rosângela, e avós José, Carmem e Herotildes por serem minha inspiração de vida, por me transmitirem de forma gratuita os seus princípios, todo o amor incondicional, carinho e humildade, sou eternamente grato por sempre aceitarem minhas escolhas, me apoiarem nestas escolhas e darem todo o suporte que eu necessito para atingir todos os meus sonhos. Obrigado sempre por tudo, amo muito vocês!



“Se for pra desistir, desista de ser fraco”.

(Will Dentili)



## RESUMO

A utilização de microalgas é crescente em diversas áreas de estudo por sua grande variedade e características. Neste contexto, a secagem é uma etapa importante na produção da biomassa de microalgas, pois permite a obtenção de um produto estável e estocável para posterior processamento. Com esta motivação, foi proposto um estudo acerca do processo de secagem da biomassa da espécie *Scenedesmus acuminatus* pela técnica de leito de jorro. Diferentes vazões de alimentação da biomassa (0,25, 0,45, 0,60 e 0,80 mL min<sup>-1</sup>) foram testadas com a temperatura do ar de secagem a 60 °C. A modelagem fenomenológica e simulação foi realizada em um primeiro momento considerando os aspectos da fluidodinâmica do ar de secagem em estado estacionário. Em um segundo passo, adicionou-se de forma acoplada e transiente os fenômenos de transferência de calor e massa referentes à secagem. Os resultados experimentais permitiram avaliar a pertinência do modelo. Vários modelos de isotermas foram ajustados aos dados experimentais, sendo que o modelo que melhor representou esses dados foi de Oswin modificado, apresentando coeficiente de determinação igual a 0,989. A modelagem fenomenológica e simulação realizada reproduziram de forma adequada o comportamento obtido no estudo experimental, resultando nos perfis de velocidade, pressão, umidade e temperatura. Com os resultados experimentais e as simulações realizadas, nota-se que uma quantidade de sólido seco é sempre acumulada na câmara de secagem até que a alimentação seja encerrada. O produto final apresentou umidade média na faixa de 5,37 a 7,3 % em base seca que se situa na faixa permitida comercialmente. No âmbito das condições testadas, a alimentação de 0,80 mL min<sup>-1</sup> gerou melhores desempenhos no secador, com eficiência da massa de sólido recuperado (58,27 %).

**Palavras-chave:** *Scenedesmus acuminatus*. Secagem. Modelagem fenomenológica e simulação. Leito de jorro.



## ABSTRACT

The use of microalgae is increasing in several study areas due to its great variety and characteristics. In this context, drying is an important step in the production of microalgae biomass, since it allows obtaining a stable product and storage for further processing. With this motivation, we propose a study of the drying process of microalgae *Scenedesmus acuminatus* by spouted bed technique. Different biomass feed flow rates (0.25, 0.45, 0.60 and 0.80 mL min<sup>-1</sup>) were tested with the temperature of the drying air at 60 °C. The phenomenological modeling and simulation was performed at first considering the aspects of fluid dynamics of the drying air in steady state. In a second step, it was added and transiently coupled heat and mass transfer phenomena related to drying. The experimental results allowed us to evaluate the relevance of the model. Several models isotherms were fitted to experimental data, and the model that best represented the data was modified Oswin, with coefficient of determination equal to 0.989. The phenomenological modeling and simulation performed correctly reproduced the behavior obtained in the experimental study, resulting in profiles of velocity, pressure, humidity and temperature. With the experimental results and the simulations carried out, it is noted that an amount of dry solid is always accumulated in the drying chamber until the feed is closed. The final product presented average humidity in the range of 5.37 to 7.3 % on a dry basis, which is in the commercially permissible range. Under the conditions tested, the feed of 0.80 mL min<sup>-1</sup> generated better performances in the dryer, with efficiency of the recovered solid mass (58.27 %).

**Keywords:** *Scenedesmus acuminatus*. Drying. Phenomenological modeling and simulation. Spouted bed.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais aplicações biotecnológicas das microalgas.....	34
Figura 2 - Representação esquemática do processo de secagem como resultado das transferências simultâneas de calor e massa.....	37
Figura 3 - Curvas de adsorção e dessorção e descrição do fenômeno de histerese.....	40
Figura 4 - Diagrama esquemático do leito de jorro.....	42
Figura 5 - Esquema geral da secagem de pastas utilizando partículas inertes como suporte.....	45
Figura 6 - Curva fluidodinâmica do leito de jorro que expressa a queda de pressão em função da velocidade superficial de entrada do ar.....	46
Figura 7 – Variedade das formas dos elementos finitos.....	52
Figura 8 – Diagrama esquemático da unidade experimental de leito de jorro (1) Entrada de ar; (2) Banho Ultratermostático; (3) rotâmetro; (4) termômetro; (5) bomba injetora; (6) câmara de secagem; (7) manômetro de tubo em U; (8) ciclone; (9) erlenmeyer.....	62
Figura 9 - Dimensões da câmara de secagem.....	64
Figura 10 - Domínio computacional em 3D.....	75
Figura 11 - Malha gerada para a simulação.....	76
Figura 12 – Domínios do modelo desenvolvido.....	77
Figura 13 - Fronteiras selecionadas para o modelo de escoamento do ar.....	81
Figura 14 - Queda de pressão no leito sem e com as partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada.....	97
Figura 15 – Vista inferior do bocal de entrada do ar de secagem.....	97
Figura 16 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada para a temperatura de 60°C.....	98
Figura 17 - Quantidade de pó produzido ao longo do tempo, para todas as vazões testadas.....	99
Figura 18 - Taxa de produção de pó em função do tempo.....	100
Figura 19 – Monitoramento da temperatura do ar de saída.....	102
Figura 20 – Umidade absoluta do ar na saída do ciclone em função do tempo.....	103
Figura 21 – Balanço total de massa para o sólido (vazão 0,25 ml min <sup>-1</sup> ).....	104
Figura 22 – Balanço total de massa da espécie líquida (vazão 0,25 ml min <sup>-1</sup> ).....	104
Figura 23 – Balanço total de massa para o sólido (vazão 0,45 ml min <sup>-1</sup> ).....	105

Figura 24 – Balanço total de massa da espécie líquida (vazão 0,45 mL min <sup>-1</sup> ).....	105
Figura 25 – Balanço total de massa para o sólido (vazão 0,60 mL min <sup>-1</sup> ). .....	105
Figura 26 – Balanço total de massa da espécie líquida (vazão 0,60 mL min <sup>-1</sup> ).....	106
Figura 27 – Balanço total de massa para o sólido (vazão 0,80 mL min <sup>-1</sup> ). .....	106
Figura 28 – Balanço total de massa da espécie líquida (vazão 0,80 mL min <sup>-1</sup> ).....	106
Figura 29 – Modelo de Oswin modificada ajustado aos pontos experimentais nas temperaturas de 40, 50 e 60°C.....	111
Figura 30 – Gráfico do logaritmo neperiano da atividade de água em função do inverso das temperaturas. ....	113
Figura 31 – Modelo ajustado aos valores do calor isostérico integral de dessorção em função da umidade de equilíbrio da pasta de microalga. .....	115
Figura 32 – Perfil de velocidade na câmara de secagem.....	116
Figura 33 – Perfil de pressão na câmara de secagem.....	117
Figura 34 – Perfil de temperatura ao longo da câmara de secagem para a condição de secagem de 333 K e 0,25 mL min <sup>-1</sup> em diferentes tempos do processo: a) 0.1 s, b) 5 s, c) 10 s e d) 500 min. ....	118
Figura 35 – Perfil de temperatura ao longo da câmara de secagem para a condição de secagem de 333 K e 0,45 mL min <sup>-1</sup> em diferentes tempos do processo: a) 0.1 s, b) 5 s, c) 10 s e d) 320 min. ....	119
Figura 36 – Perfil de temperatura ao longo da câmara de secagem para a condição de secagem de 333 K e 0,6 mL min <sup>-1</sup> em diferentes tempos do processo: a) 0.1 s, b) 5 s, c) 10 s e d) 220 min. ....	119
Figura 37 – Perfil de temperatura ao longo da câmara de secagem para a condição de secagem de 333 K e 0,8 mL min <sup>-1</sup> em diferentes tempos do processo: a) 0.1 s, b) 5 s, c) 10 s e d) 180 min.....	120
Figura 38– Curvas experimentais e simuladas da massa acumulada na câmara de secagem em função do tempo total de secagem. ....	122
Figura 39– Perfil de concentração de vapor ao final da secagem nas respectivas vazões, a) 0,25 mL min <sup>-1</sup> , b) 0,45 mL min <sup>-1</sup> , c) 0,60 mL min <sup>-1</sup> e d) 0,80 mL min <sup>-1</sup> . ....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correlações fluidodinâmicas da partícula isométrica. ....	68
Tabela 2 – Valores dos parâmetros utilizadas para determinar a viscosidade efetiva. ....	68
Tabela 3 – Valores da queda de pressão e da densidade efetiva. ....	69
Tabela 4 – Valores da condutividade térmica e calor específico do EVA. ....	69
Tabela 5 - Constituição da microalga considerada nas simulações.....	70
Tabela 6 - Expressões para a determinação da massa específica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura.....	70
Tabela 7 - Expressões para a determinação da capacidade calorífica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura.....	71
Tabela 8 - Expressões para a determinação da condutividade térmica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura.....	72
Tabela 9 - Propriedades da microalga considerada nas simulações. ....	72
Tabela 10 – Valores das constantes utilizadas no modelo $k-\epsilon$ .....	80
Tabela 11 – Valores do coeficiente convectivo de transferência de massa e calor.....	83
Tabela 12 - Teor de umidade de equilíbrio do meio poroso em função da atividade de água para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C.....	92
Tabela 13 - Parâmetros empregados nas simulações. ....	94
Tabela 14 - Caracterização da microalga <i>Scenedesmus acuminatus</i> ....	95
Tabela 15 - Propriedades das partículas de EVA. ....	96
Tabela 16 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o momento em que se inicia o regime permanente. ....	100
Tabela 17 – Porcentagens das espécies sólidas e líquidas.....	107
Tabela 18 - Principais resultados obtidos nos experimentos de secagem em leito de jorro. ....	107
Tabela 19 - Indicadores do desempenho dos experimentos de secagem em leito de jorro. ....	108
Tabela 20 – Constantes dos modelos de isoterma ajustados com os respectivos coeficientes de determinação.....	110
Tabela 21 - Valores de atividade de água entre temperaturas de 30 a 70°C e umidade de equilíbrio entre 0,04 e 0,22. ....	112
Tabela 22 – Valores calculados do calor isostérico de sorção e integral. ....	114
Tabela 23 – Valor médio da temperatura na saída da câmara de secagem e o erro padrão para todas as vazões testadas.....	121
Tabela 24 – Valor médio da concentração na saída da câmara de secagem e o erro padrão para todas as vazões testadas.....	124



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_w$	Atividade de água	(-)
$P$	Pressão parcial do vapor d'água	Pa
$P_0$	Pressão de vapor d'água pura	Pa
UR	Umidade relativa	%
Re	Número de Reynolds	(-)
$\rho$	Densidade do fluído	$\text{kg m}^{-3}$
$u$	Velocidade do escoamento	$\text{m s}^{-1}$
$D$	Diâmetro da câmara de secagem	m
$\mu$	Viscosidade do fluído	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
$j_H$	Fator de transferência de calor	(-)
$J_D$	Fator de transferência de massa	(-)
$h_c$	Coefficiente convectivo de transferência de calor	$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{°C}^{-1}$
$C_f$	Coefficiente de atrito do fluído	(-)
$C_p$	Calor específico do fluído	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$S_t$	Número de Staton	(-)
$k_m$	Coefficiente convectivo de transferência de massa	$\text{m s}^{-1}$
$S_c$	Número de Schmidt	(-)
$P_r$	Número de Prandtl	(-)
$\rho_{b,pm}$	Massa específica de bulk	$\text{kg m}^{-3}$
$m_{pms}$	Massa de pasta de microalga seca	kg
$V_{recp}$	Volume do recipiente	$\text{m}^3$
$\rho_{ap,pm}$	Massa específica aparente da pasta	$\text{kg m}^{-3}$
$V_{pic}$	Volume do picnômetro	$\text{m}^3$
$m_t$	Massa total	kg
$m_{pic}$	Massa do picnômetro	kg
$\rho_A$	Densidade da água	$\text{kg m}^{-3}$
$X_{bs}$	Teor de umidade em base seca	(-)
$X_{bu}$	Teor de umidade em base úmida	(-)
$m_A$	Massa de água no material	kg
$m_{ms}$	Massa de material seco	kg
$m_{mu}$	Massa de material úmido	Kg
$D_c$	Diâmetro da coluna de secagem	m
$D_i$	Diâmetro do orifício de entrada do ar na coluna de secagem	m
$H_c$	Altura da câmara de secagem	m
$Q_{ar}$	Vazão volumétrica do ar	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

$v_{ar}$	Velocidade de escoamento do ar	$m^3$
$A_{ar}$	Área de escoamento	$m^2$
$A_{sup,i}$	Área superficial dos inertes	$m^2$
$V_i$	Volume de uma partícula inerte	$m^3$
$r_i$	Raio médio da partícula de EVA	$m$
$n_{part,i}$	Quantidade de partículas inertes	(-)
$V_{cone}$	Volume da região cônica na câmara de secagem	$m^3$
$V_{cil,i}$	Volume da região cilíndrica com os inertes na câmara de secagem	$m^3$
$\epsilon_{EVA}$	Porosidade média do leito estático	(-)
$r$	Raio considerado no domínio	$m$
$z$	Espessura considerada no domínio	$m$
$h_1$	Altura total da região cônica da câmara de secagem	$m$
$h_2$	Altura dos inertes na região cilíndrica na câmara de secagem	$m$
$\rho_{b,EVA}$	Massa específica <i>bulk</i> do leito de partículas	$kg\ m^{-3}$
$m_{EVA}$	Massa de partículas de EVA	$kg$
$V_{recp}$	Volume do recipiente	$m^3$
$\rho_{ap,EVA}$	Massa específica aparente do EVA	$kg\ m^{-3}$
$m_{EVA}$	Massa de EVA	$kg$
$m_A$	Massa de água	$kg$
$V_A$	Volume de água	$m^3$
$V_{EVA}$	Volume ocupado pelas partículas de EVA	$m^3$
$K_I$	Constante	(-)
$C_D$	Coefficiente de arrasto	(-)
$v_t$	Velocidade terminal	$m\ s^{-1}$
$\mu_{ef}$	Viscosidade efetiva	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
$\rho_{ef}$	Densidade efetiva	$kg\ m^{-3}$
$\Delta P$	Perda de carga do sistema particulado	$Pa$
$D_{EVA}$	Diâmetro do EVA	$m$
$\rho_p$	Massa específica do meio poroso	$kg\ m^{-3}$
$x_i$	Fração mássica dos componentes	(-)
$\rho_i$	Massa específica dos componentes	$kg\ m^{-3}$
$C_{P,p}$	Capacidade calorífica do meio poroso	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
$C_{Pi}$	Capacidade calorífica dos componentes	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
$\kappa_p$	Condutividade térmica do meio poroso	$W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
$\kappa_i$	Condutividade térmica dos componentes	$W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$

$\varepsilon_{pm}$	Porosidade da pasta de microalga	(-)
$\rho_p$	Massa específica do meio poroso	$\text{kg m}^{-3}$
$R_p$	Taxa 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	$\text{g água g}^{-1}$ de pó
$m_i$	Massa de pasta de microalga introduzida no secador	g
$X_{bu,i}$	Umidade da pasta de microalga introduzida no secador, em base úmida	$\text{g água g}^{-1}$ de pasta de microalga
$X_{bu,ac}$	Umidade da massa acumulada no leito, em base úmida	$\text{g água g}^{-1}$ de material acumulado no leito
$\rho_{ap,pó}$	Massa específica aparente do pó	$\text{kg m}^{-3}$
$m_{pó}$	Massa de pó	kg
$m_{pó}$	Massa de pó	kg
$V_{mj}$	Velocidade mínima de jorro	$\text{m s}^{-1}$
$\Delta P$	Queda de pressão no leito estável	Pa
$\Delta P_{max}$	Queda de pressão máxima no leito	Pa
$V_{mf}$	Velocidade mínima de fluidização	$\text{m s}^{-1}$
$V_{ji}$	Velocidade de jorro incipiente	$\text{m s}^{-1}$
$V_{ij}$	Velocidade de início de jorro	$\text{m s}^{-1}$
$V_{max}$	Valor máximo da velocidade mínima de jorro	$\text{m s}^{-1}$
$H_{max}$	Altura máxima que os inertes atingem	m
$\rho$	Massa específica do fluido	$\text{kg m}^{-3}$
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
$\mu_T$	Viscosidade turbulenta	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
$I$	Vetor identidade	(-)
$u$	Campo de velocidade da fase fluída	$\text{m s}^{-1}$
$F$	Força gravitacional	$\text{N m}^{-3}$
$k$	Energia cinética turbulenta	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
$\varepsilon$	Dissipação da energia cinética turbulenta	
$\sigma_k$	Número de Prandtl em relação a k	(-)
$\sigma_\varepsilon$	Número de Prandtl em relação a $\varepsilon$	(-)
$C_{\varepsilon 1}$	Constante turbulenta 1	(-)
$C_{\varepsilon 2}$	Constante turbulenta 2	(-)
$C_\mu$	Constante em relação a viscosidade	(-)
$I_T$	Intensidade de turbulência	(-)

$L_T$	Escala de turbulência	m
$C_\mu$	Escala de turbulência	m
$P_k$	Produção de energia cinética turbulenta	$W m^3$
$n$	Normal à fronteira apontando para fora do domínio	(-)
$\delta_w^+$	Distância da função parede	m
$u_T$	Velocidade de atrito	$m s^{-1}$
$k_v$	Constante de Von Karman	(-)
$u_{tang}$	Velocidade tangencial à parede	$m s^{-1}$
$N_{i,ar}$	Fluxo molar da espécie i no ar	$mol m^{-2} s^{-1}$
$c_{i,ar}$	Concentração da espécie i no ar	$mol m^{-3}$
$D_{i,ar}$	Coefficiente de difusão da espécie i no ar	$m^2 s^{-1}$
$R_{i,ar}$	Taxa de reação da espécie i no ar	$mol m^{-3} s^{-1}$
$D_{i,ar,T2}$	Difusividade da espécie i no ar a temperatura do ar aquecido	$m^2 s^{-1}$
$D_{i,ar,T1}$	Difusividade da espécie i no ar a temperatura ambiente	$m^2 s^{-1}$
$T_2$	Temperatura do ar aquecido	K
$T_1$	Temperatura ambiente	K
$\Omega_{D,T1}$	Integral de colisão a temperatura ambiente	(-)
$\Omega_{D,T2}$	Integral de colisão a temperatura do ar aquecido	(-)
$N_{Av}$	Fluxo de entrada do ar	$mol m^{-2} s^{-1}$
$c_\infty$	Concentração de água no ar	$mol m^{-3}$
$u_{ar}$	Velocidade de entrada do ar na câmara de secagem	$m s^{-1}$
$C_{Aeq, \infty}$	Concentração de água no ar junto à superfície da pasta	$mol m^{-3}$
UR	Umidade relativa do ar de secagem	(-)
R	Constante universal dos gases ideais	$Pa m^3 mol^{-1} K^{-1}$
$T_{pm}$	Temperatura da pasta de microalga	K
$P_{sat,ar}$	Pressão de vapor saturado do ar	Pa
$P_{atm}$	Pressão atmosférica	Pa
$K_m$	Coefficiente de transferência de massa	$m^2 s^{-1}$
$A_{t,i}$	Área total da superfície dos inertes	$m^2$
$V_{rp}$	Volume da região porosa	$m^3$
$R_{Av}$	Taxa de produção de vapor	$mol m^{-3} s^{-1}$
$R_{ss}$	Taxa de produção de sólido seco	$mol m^{-3} s^{-1}$
$R_{As}$	Taxa de produção de água junto ao sólido seco	$mol m^{-3} s^{-1}$



$K_{p0}$	Constante de liberação do pó	$s^{-1}$
$X_{eq}$	Umidade de equilíbrio	kg de água $kg^{-1}$ de material seco
$X_0$	Umidade inicial da pasta de microalga	kg água $kg^{-1}$ de microalga úmida
$X_{bu}$	Teor de umidade em base úmida	kg de água $kg^{-1}$ de material úmido
$c_{ss}$	Concentração de sólido seco	$mol\ m^{-3}$
$N_i$	Fluxo molar da espécie i	$mol\ m^{-2}\ s^{-1}$
$c_i$	Concentração da espécie i no meio poroso	$mol\ m^{-3}$
$D_i$	Tensor de dispersão da espécie i	$m^2\ s^{-1}$
$D_{ei}$	Difusividade efetiva da espécie i	$m^2\ s^{-1}$
$S_i$	Termo de fonte da espécie i	$mol\ m^{-3}\ s^{-1}$
$c_{Al,0}$	Concentração inicial da pasta de microalga	$mol\ m^{-3}$
$Q_{alim}$	Vazão de alimentação da pasta	$m^3\ s^{-1}$
$V_{rp}$	Volume da região porosa	$m^3$
$R_{Al}$	Taxa de geração de líquido	$mol\ m^{-3}\ s^{-1}$
$R_{su}$	Taxa de geração de sólido úmido	$mol\ m^{-3}\ s^{-1}$
$C_p$	Calor específico a pressão constante	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$K_f$	Condutividade térmica do fluído	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
$T$	Temperatura absoluta	K
$\rho_{ar}$	Densidade do ar de secagem	$kg\ m^{-3}$
$C_{p,ar}$	Capacidade térmica do ar	$Pa\ m^3\ mol^{-1}\ K^{-1}$
$k_{ef}$	Condutividade térmica efetiva	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
$\theta$	Fração de volume da fase fluida	(-)
$k_p$	Condutividade térmica do meio poroso	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
$K_f$	Condutividade térmica do fluído	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
$Q_{total}$	Calor total relacionado a evaporação	$J\ kg^{-1}$
$Q_{S1}$	Calor necessário para aquecer a pasta de microalga	$J\ kg^{-1}$
$Q_{S2}$	Calor necessário para aquecer o sólido	$J\ kg^{-1}$
$Q_{iso}$	Calor isostérico integral	$J\ kg^{-1}$
$T_{pm}$	Temperatura da pasta de microalga	K
$T_{ar}$	Temperatura do ar	K
$A_{t,i}$	Área total da superfície das partículas inertes	$m^2$
$\Delta H$	Calor de vaporização da água pura	$J\ kg^{-1}$
$M_A$	Massa molar da água	$kg\ mol^{-1}$

$C_{\text{pliq}}$	Capacidade calorífica da água a pressão constante	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$M_{\text{su}}$	Massa molar do sólido	$\text{kg mol}^{-1}$
$C_{\text{psól}}$	Capacidade calorífica do sólido	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
a	Constante da Isoterma	(-)
b	Constante da Isoterma	(-)
c	Constante da Isoterma	(-)

**Subíndice “i”**

Av	Espécie vapor	(-)
ss	Espécie sólido seco	(-)
As	Espécie líquida junto ao sólido	(-)
Al	Espécie água na fase líquida	(-)
su	Espécie sólido úmido	(-)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>29</b>
1.1	OBJETIVOS .....	30
1.1.1	Objetivo geral .....	30
1.1.2	Objetivos Específicos .....	31
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	31
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>33</b>
2.1	MICROALGAS .....	33
2.1.1	Aplicação do Cultivo de Microalgas .....	35
2.2	SECAGEM .....	36
2.2.1	Fenomenologia envolvida na secagem .....	37
2.2.1.1	Transferência de calor .....	37
2.2.1.2	Transferência de massa .....	38
2.2.2	Isotermas de equilíbrio e calor isostérico .....	39
2.2.2.1	Isotermas de equilíbrio .....	39
2.2.2.2	Calor isostérico .....	40
2.2.3	Secagem em leito de jorro .....	41
2.2.3.1	Generalidades e descrição do leito de jorro .....	41
2.2.3.2	Características do leito de jorro .....	43
2.2.3.3	Detalhamento do processo de secagem da pasta .....	44
2.2.3.4	Fluidodinâmica do leito de jorro .....	45
2.2.4	Secagem em leito de jorro - estado da arte .....	48
2.2.5	Cmsol Multiphysics .....	51
2.2.6	Método dos elementos finitos .....	51
2.2.7	Classificação do escoamento .....	53
2.2.7.1	Modelos de turbulência k- $\epsilon$ .....	54
2.2.8	Analogia da transferência de massa, energia e momento .....	55
2.2.8.1	Analogia de Reynolds .....	55
2.2.8.2	Analogia de Chilton-Colburn .....	56
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>59</b>
3.1	BIOMASSA DE MICROALGA .....	59
3.1.1	Caracterização da biomassa de microalga .....	59
3.2	SECAGEM EM LEITO DE JORRO .....	61
3.2.1	Estudo experimental .....	61
3.2.1.1	Descrição da unidade experimental .....	61
3.2.1.2	Procedimento experimental .....	63
3.2.1.3	Geometria da câmara de secagem .....	64
3.2.1.4	Caracterização da unidade experimental .....	64

3.2.2	<b>Descrição e caracterização das partículas inertes (EVA)</b>	<b>65</b>
3.2.3	<b>Propriedades termo-físicas da microalga</b>	<b>69</b>
3.2.4	<b>Avaliação do desempenho do processo de secagem</b>	<b>73</b>
3.2.5	<b>Estudo computacional</b>	<b>74</b>
3.2.5.1	Geometria e malha de discretização	74
3.2.5.2	Modelagem fenomenológica	77
3.2.5.2.1	<i>Modelagem do escoamento do ar</i>	78
3.2.5.2.2	<i>Transferência de massa para as espécies formadas</i>	83
3.2.5.2.3	<i>Transferência de massa para as espécies injetadas</i>	86
3.2.5.2.4	<i>Transferência de calor no ar</i>	88
3.2.5.2.5	<i>Transferência de calor no meio poroso</i>	88
3.2.5.3	Determinação do equilíbrio higroscópico entre a pasta de microalga e o ar de secagem	92
3.2.6	<b>Parâmetros utilizados na simulação</b>	<b>93</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>95</b>
4.1	<b>CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA DE MICROALGA E DAS PARTÍCULAS INERTES</b>	<b>96</b>
4.1.1	<b>Caracterização da biomassa de microalga</b>	<b>95</b>
4.1.2	<b>Caracterização das partículas inertes</b>	<b>95</b>
4.2	<b>ESTUDO EXPERIMENTAL</b>	<b>96</b>
4.2.1	<b>Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro</b>	<b>96</b>
4.2.2	<b>Análise do processo de secagem em leito de jorro</b>	<b>99</b>
4.2.3	<b>Temperatura e umidade do ar na saída do ciclone</b>	<b>101</b>
4.2.4	<b>Balanco de massa total para o sólido e água na câmara de secagem</b>	<b>103</b>
4.2.5	<b>Avaliação do desempenho do processo de secagem</b>	<b>107</b>
4.2.6	<b>Isoterma de equilíbrio e calor isostérico</b>	<b>109</b>
4.2.6.1	Determinação do equilíbrio higroscópico entre o ar de secagem e a pasta de microalga	109
4.3	<b>ESTUDO COMPUTACIONAL</b>	<b>115</b>
4.3.1	<b>Perfil de velocidade</b>	<b>115</b>
4.3.2	<b>Perfil de pressão</b>	<b>117</b>
4.3.3	<b>Perfil de temperatura</b>	<b>118</b>
5	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>125</b>
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>127</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>129</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A imensa biodiversidade das microalgas e consequente variabilidade na composição bioquímica da biomassa obtida das culturas de microalgas, aliadas ao emprego de melhoramento genético e ao estabelecimento de tecnologia de cultivo em grande escala, vêm permitindo que determinadas espécies sejam utilizadas comercialmente (DERNER et al., 2006). Tendo como consequência um crescente interesse na pesquisa e aplicação de microalgas por diversos autores ao redor do mundo.

Microalgas são utilizadas em uma ampla gama de aplicações, como na indústria farmacêutica, alimentícia, de cosméticos, na biorremediação de água residuais (MOSTAFA, 2012; BAUMGARTNER et al., 2013; BARROS, et al., 2015). Diante da atual necessidade por fontes de energia renováveis e menos poluentes, e com a imensa biodiversidade de microalgas, diversos estudos têm sido realizados buscando por soluções que viabilizam o seu uso como matéria-prima para a obtenção de biocombustíveis (MASSART et al., 2014).

A secagem é um processo de fundamental importância do ponto de vista físico, a secagem de pastas pode ser definida como um balanço entre a transferência de calor da corrente de ar para a superfície da pasta, e a transferência de umidade da superfície da pasta para a corrente de ar. Durante a secagem, a água se movimenta de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, significando que a parte externa deve estar mais seca que a parte interna (SANTOS, 2013).

Portanto o processo de secagem se faz necessário, pois a retirada da umidade de um determinado material inibe a formação e crescimento de micro-organismos que causam a decomposição e minimiza muitas reações deteriorativas. Outra vantagem da secagem é que a retirada da umidade reduz o peso e volume do produto seco, além de aumentar o tempo de armazenamento do produto, reduzindo de maneira significativa os custos com embalagem e transporte (VELÁZQUEZ-GUTIÉRREZ et al., 2015).

No que se refere a secagem de microalgas há um elevado gasto de energia nesta operação, que pode representar até 30 % dos custos totais de produção. É de fundamental importância o uso mais eficiente dos recursos energéticos através de equipamentos de secagem que reduzam a demanda energética (BAGCHI; RAO; MALLICK, 2015).

A secagem em leito de jorro é bastante utilizada na secagem de pastas, o regime fluidodinâmico observado em equipamentos do tipo leito de jorro propicia uma série de vantagens, como a excelente mistura dos

sólidos e o intenso contato fluido-sólido estão entre as características que permitem uma secagem segura e eficiente, ocorrendo com altas taxas de transferência de calor e massa, o que permite que se obtenha produtos com granulometria fina e uniforme em menor tempo de contato, o que contribui para a qualidade do produto desidratado (NASCIMENTO, 2013). Além disso, a secagem de pastas em leito de jorro apresenta 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 de alta qualidade (MARRETO, 2006).

Os modelos matemáticos têm o intuito de descrever os processos reais da melhor maneira possível e sua eficácia na representação de qualquer processo depende da coerência entre o modelo e o sistema real, além da qualidade dos parâmetros utilizados (PERUSSELLO, 2013).

A modelagem e simulação do escoamento do ar e da secagem de pastas no interior de um secador de leito de jorro é capaz de produzir resultados de perfis de velocidade, temperatura e umidade que podem auxiliar na definição de condições otimizadas do processo resultando no aumento do desempenho do secador e na redução de custos. No presente trabalho, foi realizado um estudo acerca da secagem em leito de jorro da microalga *Scenedesmus acuminatus*. O tema foi tratado com duas diferentes abordagens, a primeira relacionada ao estudo experimental e a segunda com relação à modelagem matemática e simulação do processo.

Para o estudo da simulação numérica que representa o sistema de operação da secagem em leito de jorro, utilizou-se o software COMSOL *Multiphysics*. O método de solução das equações de transferência de massa, quantidade de movimento e energia utilizado pelo COMSOL é o método dos elementos finitos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo experimental, modelar e simular os fenômenos de escoamento, transferência de calor e massa do processo de secagem por convecção da biomassa da microalga *Scenedesmus acuminatus* pela técnica de leito de jorro.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar a curva fluidodinâmica da queda de pressão em função da velocidade do ar no secador em leito de jorro para obtenção dos parâmetros de operação;

- Caracterizar a secagem em leito de jorro da biomassa da microalga *Scenedesmus acuminatus* através de curvas de produção de biomassa seca em função do tempo com o intuito de alcançar o regime estacionário;

- Determinar a influência da vazão de alimentação das microalgas *Scenedesmus acuminatus* no teor de umidade em base seca da biomassa seca produzida e na massa acumulada na câmara de secagem;

- Realizar a avaliação dos indicadores da taxa de recuperação de produto, eficiência na produção de pó e massa acumulada na câmara no desempenho da secagem em leito de jorro;

- Modelar e simular a secagem em leito de jorro considerando os fenômenos de escoamento, transferência de calor e massa de modo a representar os resultados experimentais;

- Analisar a evolução dos perfis simulados de temperatura e umidade durante a secagem, juntamente com o comportamento fluidodinâmico do escoamento através dos perfis de velocidade e pressão no regime estacionário.

## 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 e a motivação para o trabalho.

No segundo capítulo são apresentados conceitos básicos e uma revisão bibliográfica dos temas abordados na dissertação, que incluem aspectos relevantes acerca das microalgas e do processo de secagem, com foco no método de secagem em leito de jorro.

No terceiro capítulo são apresentados a metodologia utilizada para o estudo, detalhando a caracterização da microalga e dos inertes utilizados, bem como as equações gerais para o transporte de quantidade

de movimento com turbulência, calor e massa juntamente com os modelos matemáticos que descrevem esses fenômenos.

No capítulo 4, se encontram os resultados obtidos com os experimentos e as simulações realizadas. As conclusões do estudo realizado são apresentadas no quinto capítulo. No capítulo 6, sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MICROALGAS

No ambiente natural, assim como nos cultivos, o crescimento de uma população de microalgas é resultado da interação entre fatores biológicos, físicos e químicos. Os fatores biológicos estão relacionados às próprias taxas metabólicas da espécie cultivada, bem como com a possível influência de outros organismos sobre o desenvolvimento algal. Quanto aos fatores físico-químicos, são principalmente reportados estudos sobre iluminação, temperatura, salinidade e disponibilidade de nutrientes (DERNER et al., 2006).

As microalgas constituem um grupo heterogêneo de micro-organismos. São predominantemente aquáticas, unicelular com estrutura e organização simples. Apresentam crescimento rápido podendo formar colônias. Podem prosperar em águas hiposalinas e hipersalinas, em uma faixa larga de temperatura, suportando diferentes intensidades luminosas e diferentes valores de pH (MOSTAFA, 2012).

As microalgas são seres eficientes na conversão da energia solar em metabólitos, tais como lipídios, proteínas, hidratos de carbono, pigmentos e vitaminas (BORGES et al., 2011).

A imensa biodiversidade e consequente variabilidade na composição bioquímica da biomassa obtida das culturas de microalgas, aliadas ao emprego de melhoramento genético e ao estabelecimento de tecnologia de cultivo em grande escala, vêm permitindo que determinadas espécies sejam comercialmente utilizadas. Nesse sentido, cultivos de microalgas têm sido realizados visando à produção de biomassa tanto para uso na elaboração de alimentos quanto para a obtenção de compostos naturais com alto valor no mercado mundial (DERNER et al., 2006).

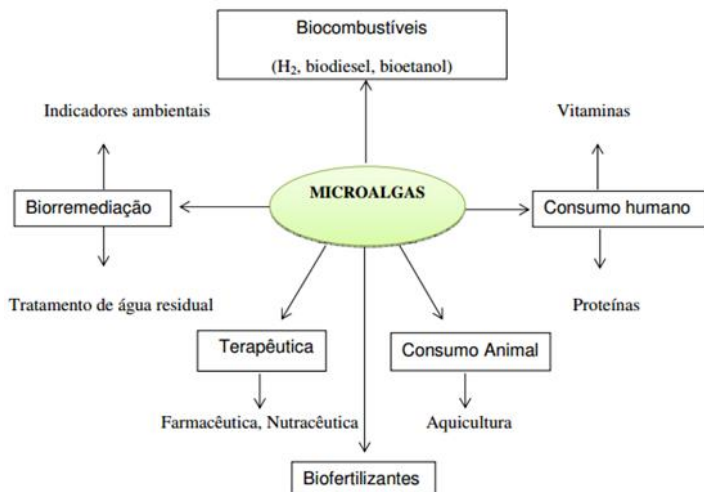
Nos últimos anos houve um aumento das atividades, processos e aplicações que envolvem o uso de microalgas e sua biomassa, contudo as perspectivas de uso desses micro-organismos dependem do cultivo das espécies em larga escala (BAUMGARTNER et al., 2013).

A possibilidade de uso desses micro-organismos depende do cultivo, já que nem sempre é possível encontrar uma determinada espécie de microalga em quantidade suficiente no ambiente natural. Nesse sentido, a evolução das pesquisas, incluindo os avanços com relação aos meios de cultivo mais eficientes tornam-se necessários (BAUMGARTNER et al., 2013).

Microalgas do gênero *Scenedesmus* são bastantes utilizadas em pesquisas, por sua reprodução acelerada, relação custo benefício satisfatória, fácil adaptação às variações ambientais e por gerar uma biomassa de alta qualidade (BAUMGARTNER et al., 2013; LARRONDE-LARRETCHÉ; JIN, 2016; CHANDRA et al., 2016). Outra vantagem na utilização desta microalga é que ela pode ser utilizada com diversos meios de cultura, como mostrado por Baumgartner et al. (2013) que testaram diversos meios de culturas e o meio de cultura pôde ser diluído em uma proporção dez vezes menor sem comprometer a produtividade.

Biotecnologia de micro-organismos tem sido desenvolvida para diferentes aplicações comerciais. Algumas espécies de microalgas destacam-se por apresentar características de interesse para a indústria, por exemplo na indústria farmacêutica, pois produzem compostos bioativos como antioxidantes e antibióticos. Também são usados como suplementos nutricionais para o consumo humano, devido aos elevados teores de proteínas e polissacarídeos. Microalgas podem desempenhar um papel importante na biorremediação de água residuais e sequestro de carbono (MOSTAFA, 2012; HARUN et al., 2010 apud DANTAS, 2013; BARROS, et al., 2015). Um fluxograma das principais aplicações das microalgas é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Principais aplicações biotecnológicas das microalgas.



Fonte: Adaptado de Harun et al (2010) *apud* Dantas (2013).

### 2.1.1 Aplicação do Cultivo de Microalgas

A biomassa produzida destina-se às mais diversas aplicações, na qual destaca-se as mais relevantes. Uma primeira aplicação que pode ser citada da utilização das microalgas é como suplemento alimentar humano e animal, como demonstrado por Becker (2007) através de análises abrangentes e estudos nutricionais que as proteínas de fontes de microalgas são de alta qualidade e comparável às proteínas vegetais, podendo, portanto, serem utilizadas como ração animal e para consumo humano, como testadas na preparação de pães e macarrões. Como alimento animal uma aplicação se dá na aquicultura, para a alimentação direta ou indireta de algumas espécies de peixes, moluscos, crustáceos e de diversos organismos forrageiros de interesse econômico, onde a aplicação dessas microalgas na alimentação desses animais trouxe aspectos benéficos, como o melhor controle de peso, melhoria na fertilidade, pele mais saudável, entre outros (MOSTAFA, 2012; SUALI; SARBATLY, 2012).

Outra alternativa potencial para aplicação de microalgas é na produção de biocombustíveis, devido à sua elevada eficiência fotossintética, duplicação da biomassa em um intervalo de tempo relativamente curto, utilizando um espaço físico menor do que as plantas oleaginosas por exemplo, não são necessárias áreas cultiváveis ou água potável, não competindo portanto com a agricultura e à sua produção não ser sazonal permitindo a obtenção de matéria-prima continuamente durante todo o ano, fatores esses que permitem estimar elevada produção em óleo. De acordo com Oliveira (2013) estas vantagens permitem obter uma produção média de biodiesel de microalgas, de 100 a 200 vezes superior ao obtido com sementes de plantas oleaginosas. Porém, apesar de promissora a produção de lipídios de microalgas para biocombustíveis, em escala industrial, possui a desvantagem de apresentar altos custos.

Apesar do grande potencial e das vantagens apontadas para o uso de microalgas, ainda existem entraves científicos e tecnológicos que inviabilizam a produção de biodiesel de microalgas em larga escala. No trabalho realizado por Menezes (2015) utilizando uma microalga dulcícola que apresenta teores e perfis de ácidos graxos adequados para a produção do biodiesel, foi constatado uma produtividade volumétrica cerca de 11 vezes superior a semente de soja, concluindo que a produção de biodiesel utilizando microalgas pode vir a ser uma realidade em grande escala.

Dentre os inúmeros compostos extraídos, ou com potencial de exploração comercial, podem ser relacionados ácidos graxos poli-

insaturados, carotenoides, ficobilinas, polissacarídeos, vitaminas, esteróis e diversos compostos bioativos naturais (antioxidantes, redutores do colesterol etc.), os quais podem ser empregados especialmente no desenvolvimento de alimentos funcionais, por suas propriedades nutricionais e farmacêuticas (DERNER et al., 2006).

Referente a utilização ambiental, as microalgas podem desempenhar um papel de fundamental importância na biorremediação de águas residuais e sequestro de dióxido de carbono (BARROS et al., 2015). Como as águas residuais apresentam nutrientes essenciais para o crescimento de microalgas, pode-se aliar o crescimento destas com a limpeza biológica das águas, que tem se mostrado um ramo bastante promissor (OLIVEIRA, 2013; SUALI; SARBATLY, 2012; BAUMGARTNER et al., 2013). Suali e Sarbatly (2012) mostram que as microalgas reduzem a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO) em águas residuais.

Utilizar os nutrientes presentes em efluentes industriais e efluentes de tratamento anaeróbico de esgoto sanitário é uma alternativa para reduzir os custos no cultivo de microalgas, além de promover um destino adequado a esses resíduos. Tais efluentes oferecem características propícias para o desenvolvimento da microalga *Chlorella sp.*, que apresentou um crescimento celular na ordem de  $10^7$  células mL<sup>-1</sup>, mostrando a possibilidade de reutilização dos meios de cultivo como suplementação nutricional (LOPES et al., 2015).

## 2.2 SECAGEM

De acordo com Perry e Green (2007) a secagem consiste em um processo simultâneo de transferência de calor e de massa, que tem por finalidade eliminar um líquido volátil contido em um corpo não volátil através da evaporação.

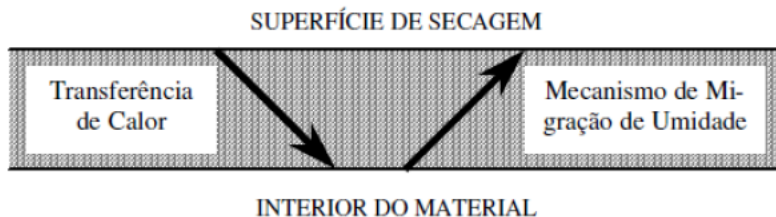
A secagem tem por objetivo reduzir o teor de umidade de um material sólido de forma que as características físicas e químicas do material seco sejam preservadas, aumentando o tempo de prateleira deste material, de maneira que este material possa posteriormente ser processado. Para a retirada desta umidade, faz-se uso de equipamentos denominados secadores. O secador fornece calor necessário para o aumento da pressão de vapor da umidade do material sólido, utilizando um meio de secagem menos úmido, de maneira que a migração de umidade seja potencializada do material para o meio (GEANKOPLIS, 1993).

Transferência de calor e massa não são as únicas preocupações quando se está projetando ou operando um secador, a qualidade do produto (cor, partícula, dureza, densidade, textura, sabor, entre outros) também é fortemente dependente das condições de secagem e das transformações físicas e químicas ocorrendo no secador (PERRY; GREEN, 2007).

De acordo com Velázquez-Gutiérrez et al. (2015) a retirada da umidade de um determinado material inibe a formação e crescimento de micro-organismos que causam o apodrecimento e minimiza reações deteriorativas. Outra vantagem da secagem é que a retirada da umidade reduz o peso e volume do produto seco, além de aumentar o tempo de armazenamento do produto, reduzindo de maneira significativa os custos com embalagem e transporte.

O movimento de água do interior do material até a superfície é analisado pelos mecanismos de transferência de calor e massa, que indicará a dificuldade de secagem dos materiais. Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do material ao ambiente, a água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície. Um esquema do processo de secagem no interior do sólido é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática do processo de secagem como resultado das transferências simultâneas de calor e massa.



Fonte: Alonso (2001) *apud* Dias (2013).

## 2.2.1 Fenomenologia envolvida na secagem

A seguir, será realizada uma apresentação dos fenômenos de transferência de calor e massa, que ocorrem em distintos processos de secagem.

### 2.2.1.1 Transferência de calor

Transferência de calor (ou calor) é energia térmica em trânsito devido uma diferença de temperatura no espaço (INCROPERA et al., 2007).

No projeto de uma planta em que o calor deve ser trocado com o ambiente, o tamanho do equipamento de transferência de calor, o material do qual é construído e os equipamentos auxiliares necessários para a sua utilização devem ser levados em conta, pois o equipamento deve cumprir a sua missão necessária, mas deve ser em contrapartida, de baixo custo e fácil de operar (WELTY, et al., 2008).

Há três modos de transferência de energia, a condução, convecção e radiação, em que qualquer processo de transferência de calor envolve um ou mais desses modos. Todos estes modos requerem a existência de uma diferença de temperatura e ocorre do meio de maior temperatura para o de menor temperatura (WELTY, et al., 2008).

Segundo Çengel e Ghajar (2015) a condução é a transferência de energia a partir das partículas mais energéticas de uma substância para as menos energéticas adjacentes como resultado das interações entre as partículas. A convecção é a transferência de calor de uma superfície sólida e o líquido ou gás adjacente que está em movimento, e que envolve os movimentos combinados de condução e movimento do fluido.

Os equipamentos de transferência de calor tais como trocadores de calor, caldeiras, condensadores, radiadores, aquecedores, fornos, geladeiras e coletores solares são projetados principalmente com base numa análise de transferência de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2015).

#### 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. A transferência de massa refere-se ao movimento de uma espécie química a partir de uma região de alta concentração para uma região de concentração inferior de modo a minimizar esta. A força motriz para o escoamento de um fluido é a diferença de pressão, já para a transferência de massa é a diferença de concentração (ÇENGEL; GHAJAR, 2015; 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, adicionando as características dinâmicas do fluxo. 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. Os mecanismos de transferência de calor e massa são análogos entre si, portanto, como no caso da transferência de calor, os dois mecanismos de transferência de massa ocorrem frequentemente de maneira simultânea (WELTY et al., 2008; ÇENGEL; GHAJAR, 2015).

## 2.2.2 Isotermas de equilíbrio e calor isotérico

### 2.2.2.1 Isotermas de equilíbrio

As isotermas são as 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 (RESENDE et al., 2015; TIENDREBEOGO et al., 2015; PARK et al., 2007; PERUSSELLO, 2013).

Park et al. (2007) ressalta a importância da atividade de água para todo o tipo de processamento e conservação. Portanto, o conhecimento das curvas de equilíbrio é indispensável para determinar o teor de água final necessário para estabilizar um produto.

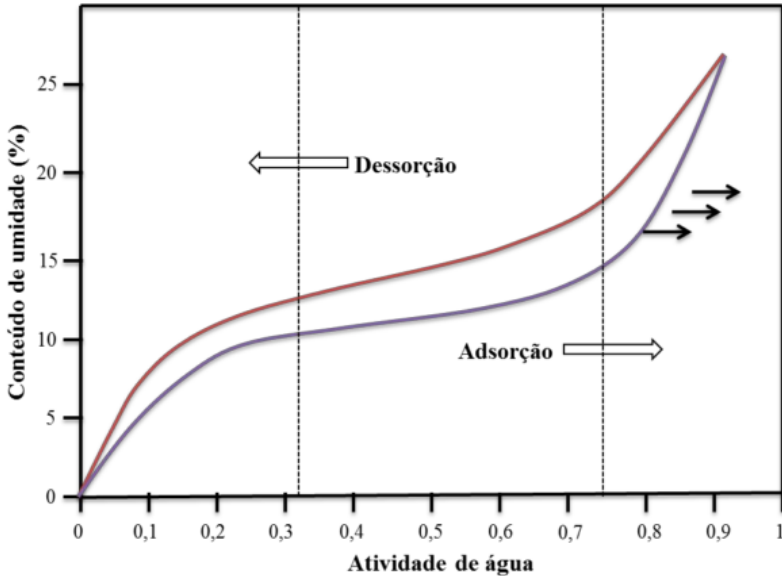
A atividade de água ( $a_w$ ) está relacionada com a umidade relativa do ambiente (UR), como mostrado na Equação 1, com a condição de ser ter uma baixa pressão e temperaturas no equilíbrio. Sua definição considera a razão entre a pressão parcial de vapor d'água no material (P) e a pressão de vapor d'água pura ( $P_0$ ), ambas na mesma temperatura.

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{UR}{100} \quad (1)$$

De acordo com Resende (2015) o teor de água de equilíbrio higroscópico das sementes de *Buchenaia capitata* é diretamente proporcional à atividade de água e decresce com o aumento de temperatura para um mesmo valor de umidade relativa de equilíbrio

A representação gráfica das isotermas pode ser de adsorção ou dessorção, dependendo da determinação do produto a ser feita, onde a adsorção consiste na umidificação do material sólido e a dessorção consiste na secagem do material sólido. Estas curvas de adsorção e dessorção não coincidem, e esta diferença entre as isotermas é conhecida como o fenômeno de histerese, como mostrado na Figura 3 para a *Spirulina*, na temperatura de 25°C.

Figura 3 - Curvas de adsorção e dessorção e descrição do fenômeno de histerese.



Fonte: Souza (2015).

Para prever o comportamento das isotermas de sorção, diversos autores propuseram a utilização de modelos de ajuste que descrevessem o comportamento do material desejado (TIENDREBEOGO et al., 2015; PARK et al., 2007).

As isotermas são muito importantes pois podem ser usadas também para o projeto e otimização de equipamentos de secagem, através do equilíbrio higroscópico, pode-se estimar a quantidade de energia necessária para a secagem de determinado material, para isto é necessário determinar o calor isostérico (RESENDE et al., 2015).

### 2.2.2.2 Calor isostérico

O calor isostérico de sorção é obtido, em geral, a partir de dados de equilíbrio higroscópico e é definido, termodinamicamente, como a diferença entre a entalpia da água na fase de vapor e a entalpia da água líquida adsorvida no sólido, isto é, representa a quantidade de energia necessária para evaporar a água adsorvida na fase sólida do produto (LIMA et al., 2008).



Em geral, o calor isostérico de sorção é maior que o calor latente de vaporização da água pura a uma dada temperatura e pode ser considerado como um indicativo de forças de atração intermoleculares entre os sítios sortivos e a água (STRUMILLO; JONES; ZYLLA, 2006 apud SOUZA 2015).

De acordo com Resende et al. (2015), as isotermas de sorção são usadas para vários propósitos, tais como: a determinação do tempo de secagem ou, ainda, predições para misturar e embalar os produtos, prevendo as mudanças de umidade que ocorrem durante a armazenagem e, conseqüentemente, a sua estabilidade.

O calor isostérico de sementes de *B. capitata* aumenta com a diminuição do teor de água de equilíbrio, sendo assim, é necessário maior quantidade de energia para retirar a água (RESENDE et al., 2015).

### **2.2.3 Secagem em leito de jorro**

#### **2.2.3.1 Generalidades e descrição do leito de jorro**

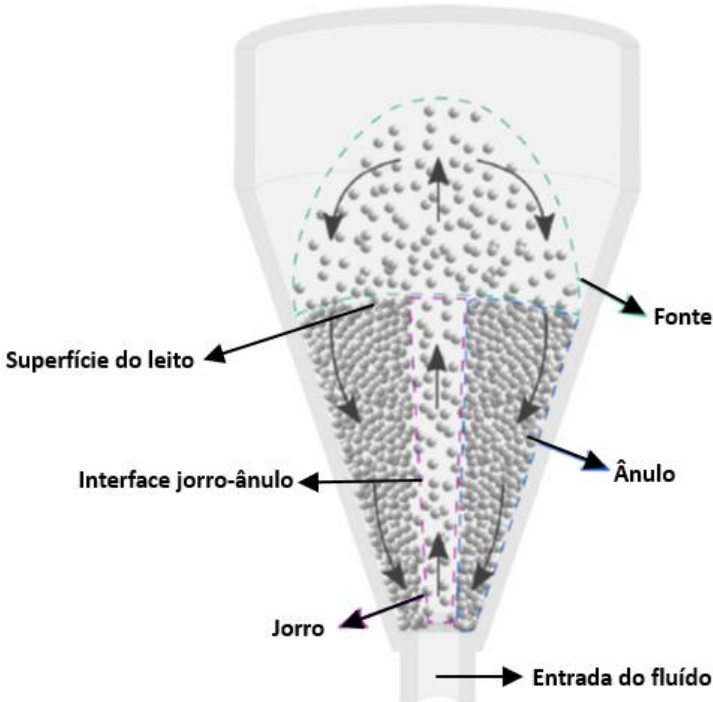
O secador do tipo leito de jorro foi desenvolvido inicialmente por Marthur e Epstein em 1954 para a secagem de grãos de trigo em um processo que permite a aplicação de maiores quantidades de calor sem perder a qualidade do material (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

O leito de jorro convencional, como o empregado por Marthur e Epstein, é constituído por uma câmara de secagem conectada a uma base cônica, onde a base cônica possui em sua extremidade inferior um orifício de reduzida dimensão, através do qual o fluído de jorro que normalmente é ar, é alimentado no sistema. Outros tipos de configurações de leito de jorro como o prismático e o retangular, também podem ser empregadas (HOSSEINI; FATTAHI; AHMADI, 2015; SALIKOV et al., 2015).

O regime de jorro é estabelecido pela entrada de um jato de fluido em um leito de sólidos particulados, também conhecidos como inertes. Após a entrada do fluido, normalmente constituído por ar, através da extremidade inferior da base cônica, nota-se com o aumento gradativo da vazão do fluído que surge uma aceleração ascendente das partículas sólidas presentes no interior da câmara com formação de um canal central diluído, denominado de região de jorro. Ao redor do canal central, verifica-se 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, esta região que compreende o leito deslizante de partículas recebe a denominação de ânulo ou região anular. Quando as partículas provenientes da região de jorro atingem a

superfície do leito, conhecida como região fonte, as mesmas desaceleram e caem sobre a região anular. Por fim, essas partículas descreverão uma trajetória de volta para a região de jorro, fechando o ciclo que se mantém até o final da operação de secagem. A Figura 4 ilustra esquematicamente a movimentação cíclica e ordenada das partículas em um leito de jorro convencional (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

Figura 4 - Diagrama esquemático do leito de jorro.



Fonte: adaptado de Artetxe et al., (2015).

Costa et al. (2015) verificou que a pasta apresenta influência na fluidodinâmica do leito de jorro, onde a presença da pasta dificultava a movimentação dos inertes na região anular e também favorece a formação de regiões estagnadas.

O leito de jorro apresenta um contato sólido-fluido com características bem distinta da fluidização, o que faz com que ele possa realizar determinadas operações que não podem ser executadas em leitos

fluidizados, como por exemplo, operar com partículas maiores que 1mm, quando o ar é usado como fluido (SOUSA; FREIRE; FREIRE, 2011).

Dentre os secadores convectivos, o secador em leito de jorro com partículas inertes apresenta a vantagem de exibir altas taxas de transferência de calor e massa, o que permite que se obtenha produtos com granulometria fina e uniforme em menor tempo de contato, o que contribui para a qualidade do produto desidratado. Os fatores relacionados com as taxas determinam o desempenho da secagem. (MEDEIROS, 2001).

Um entendimento e controle adequado do comportamento fluidodinâmico do leito de jorro se faz necessário, visando contornar algumas desvantagens desta operação. 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, se é que não tornam inviável o uso da técnica de leito de jorro em grande escala (MARRETO, 2006).

#### 2.2.3.2 Características do leito de jorro

A técnica de leito de jorro desenvolvida inicialmente para a secagem de produtos granulares vem sendo aplicada entre outros na secagem de pastas (CHIELLE et al., 2016; COSTA et al., 2015; FUJITA et al., 2013) e no recobrimento de comprimidos (ADEODATO, 2003). Dentre os secadores convectivos, o secador em leito de jorro com partículas inertes apresenta a vantagem de exibir altas taxas de transferência de calor e massa, o que permite que se obtenha produtos com granulometria fina e uniforme em menor tempo de contato, o que contribui para a qualidade do produto desidratado (NASCIMENTO, 2013).

A velocidade superficial do fluido necessária para o jorro aumenta com a profundidade do leito e diâmetro do orifício e diminui com a medida que o diâmetro do leito é aumentado (PERRY; GREEN, 2007). Os parâmetros fluidodinâmicos sofrem ainda, influência das propriedades e dimensões das partículas inertes e da geometria do leito como o ângulo do cone e a relação entre os diâmetros da parte cilíndrica e do orifício de entrada de ar. Olazar et al. (2011) constataram que existem limites de operação para ângulos de cone, para a razão entre o diâmetro de entrada de ar e o diâmetro inferior da base cônica, assim como para a razão entre o diâmetro de entrada de ar e o diâmetro das partículas inertes.

Durante o movimento cíclico, os sólidos são submetidos pela vazão de fluido a um choque mecânico, devido ao impacto uns com os outros e contra a parede do leito. Como efeito ocorre o desgaste (abrasão da superfície sólida) que promove a redução no tamanho dos sólidos, em relação à dimensão original. Esse efeito gera um resíduo fino que na grande maioria das vezes é inaceitável e, portanto, devendo ser removido do processo por ciclones ou outros equipamentos de separação sólido-fluido (SOUSA; FREIRE; FREIRE, 2011).

Mathur e Epstein (1974) verificaram que a velocidade mínima de fluidização é dependente tanto das propriedades do sólido e do fluido, bem como da geometria do equipamento. A alimentação da suspensão pode ser por gotejamento ou pulverização com auxílio de um bico injetor. Pode ser feita na parte superior do equipamento, na base central da coluna ou no interior da região anular (SOUZA, 2009).

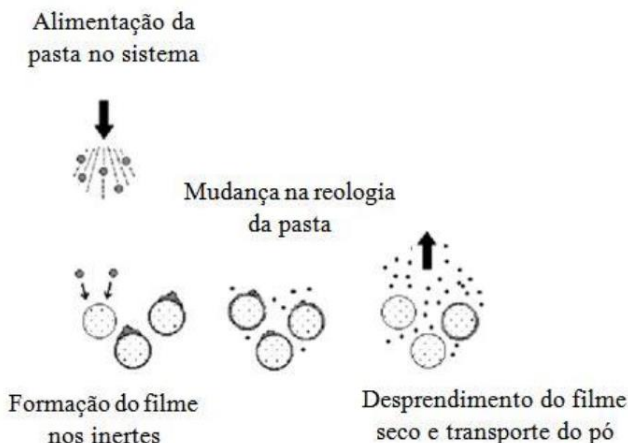
### 2.2.3.3 Detalhamento do processo de secagem da pasta

Nesse tipo de secador, a pasta injetada pelo bocal de alimentação sobre o leito, reveste as partículas inertes com uma fina camada de material, conforme se observa na Figura 5. Na medida em que se processa a secagem, a película do material é aderido na superfície do inerte devido à intensa força de coesão entre as partículas e os inertes, mas se torna frágil no decorrer da secagem, pois há fenômenos de transferência de calor convectiva a partir da corrente de ar, bem como a transferência de calor por condução entre o inerte e o filme, assim o filme é seco e ocorre a fragmentação devido a energia suficiente para quebrar a película, resultante dos efeitos de colisões interparticulares e com a câmara de secagem, e o produto na forma de pó é então arrastado para fora pela corrente de ar, e coletado pelo sistema de separação acoplado à câmara de secagem através de um ciclone conectado ao secador e a partícula inerte é recoberta por uma nova película de pasta reiniciando o ciclo.

Partículas inertes de diversos tipos de materiais podem ser utilizadas como suporte para a secagem de pastas, frutas, fármacos e tantos outros. Entre os materiais mais utilizados e que merecem destaque, estão o vidro, polietileno e o copolímero etileno-acetato de vinila (EVA) (COSTA et al., 2015; SOUSA; FREIRE; FREIRE, 2011).

Costa et al. (2015) realizou a secagem de açúcar em leito de jorro, e concluiu que a temperatura média das partículas inertes é inferior a temperatura média do ar de secagem, portanto, material termo sensível pode ser seco no leito de jorro dependendo das condições de secagem.

Figura 5 - Esquema geral da secagem de pastas utilizando partículas inertes como suporte.



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

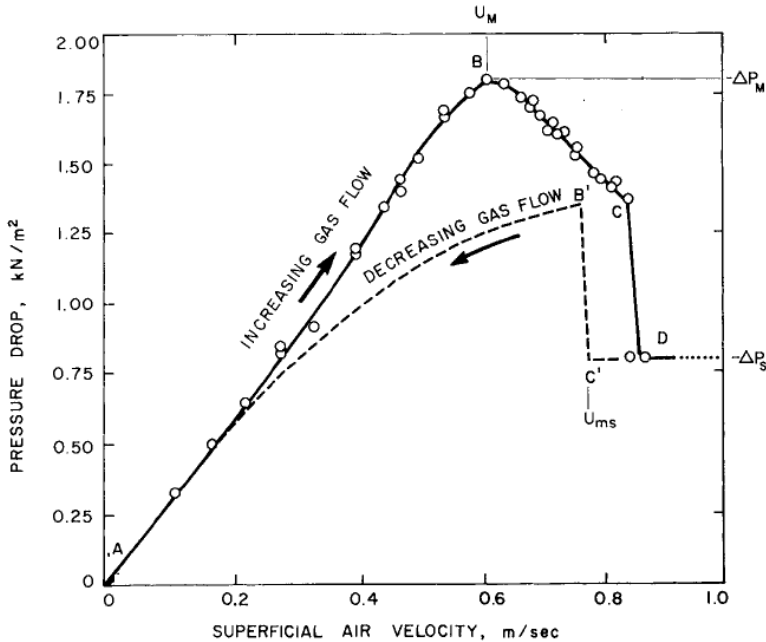
No entanto, muitas vezes as taxas de remoção da película são muito baixas, promovendo acumulação do material no leito, e essa acumulação é considerada como um grave problema, podendo até mesmo inviabilizar a secagem de diversos materiais neste tipo de secador, ou seja, levar o sistema de jorro ao colapso, interrompendo o processo de secagem. São dois os fatores limitantes que governam a performance do secador: as taxas de transferência de calor e massa e a aderência da película que envolve as partículas inertes. Um desses fatores pode ser limitante do processo, o primeiro vai estar relacionado a taxa de secagem e o segundo a estabilidade da fonte, pois uma película de forte adesão pode gerar um acúmulo de partículas e levar o sistema ao colapso. Esses fatores podem ser influenciados pelas variáveis de processo, tais como: vazão de alimentação da suspensão e do ar, as propriedades do material a ser seco e pela localização da alimentação que influencia o desempenho do secador e conseqüentemente a qualidade do produto final (umidade, granulometria, densidade) (NASCIMENTO, 2013; MEDEIROS, 2001, SOUZA, 2009).

#### 2.2.3.4 Fluidodinâmica do leito de jorro

Mathur e Epstein (1974) descrevem a metodologia para obtenção da curva característica do equipamento de jorro indicada na Figura 6, que representa uma curva característica da queda de pressão do leito em

função da velocidade superficial do ar, e a partir da mesma, os parâmetros envolvidos na secagem em leito de jorro são obtidos, que é a velocidade mínima de jorro ( $v_{mj}$ ) e a queda de pressão estável ( $\Delta P$ ). A altura máxima de jorro estável ( $H_{max}$ ) é outro parâmetro fluidodinâmico de relevante importância na secagem em leito de jorro. (MARRETO, 2006; MATHUR; EPSTEIN, 1974). 0

Figura 6 - Curva fluidodinâmica do leito de jorro que expressa a queda de pressão em função da velocidade superficial de entrada do ar.



Fonte: Mathur e Epstein, (1974).

Analisando a figura acima pode-se observar um comportamento semelhante a de um leito fixo à baixas vazões de ar, onde inicialmente o gás somente passa pelas partículas sem movimentá-las, com o aumento da vazão de ar representado pelo segmento AB, ocorre um deslocamento das partículas próximas ao orifício de entrada. Assim, com o aumento da vazão de ar é formada uma cavidade circundada por uma camada sólida compacta, essa compactação passa a oferecer grande resistência ao fluxo de ar, resultando em um aumento da queda de pressão, até que no ponto B, ocorre a queda de pressão máxima ( $\Delta P_{max}$ ), o valor da velocidade superficial correspondente é a velocidade mínima de fluidização. Como

o fluxo de ar superou a maior resistência oferecida pelo inertes, qualquer aumento da vazão de ar diminui a queda de pressão, representado pelo segmento BC, pois a altura de jorro interno é maior que os sólidos compactados acima desta. Nesta fase, o jorro é denominado de incipiente, quando qualquer aumento na vazão de gás faz com que a queda de pressão caia bruscamente até que o jorro estável seja estabelecido, representado pelo ponto D, quando o jorro aflora através da superfície do leito a velocidade mínima de jorro ( $v_{mj}$ ) é facilmente obtida diminuindo lentamente a vazão do fluido até chegar no ponto C', que representa a condição de mínimo jorro, sendo que qualquer aumento na vazão acarretará apenas em um aumento na fonte. Após este ponto, a redução da taxa de fluxo faz com que a pressão caia de forma constante ao longo BA. Deve-se ressaltar que existe um valor 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 (SOUZA, 2009, MATHUR; EPSTEIN, 1974).

De acordo com Oliveira et al., (2009) a altura máxima de jorro estável ( $H_{max}$ ) está relacionada à estimativa da quantidade total de material que será processado em cada corrida do equipamento de secagem e 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.

O valor da queda de pressão máxima ( $\Delta P_{max}$ ) relacionado a queda de pressão que ocorre um pouco antes de o regime de jorro ser estabelecido e pode ser atribuído à elevada demanda energética necessária para romper a estrutura do leito, este valor é de grande importância para o projeto de sopradores de ar em uma unidade de leito de jorro. A perda de carga ou queda de pressão ao longo do jorro estável ( $\Delta P$ ) 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 et al., 2009).

A velocidade mínima de fluido necessária para a manutenção do jorro é denominada de velocidade mínima de jorro ( $v_{mj}$ ), esta velocidade depende das propriedades do fluido e das partículas, bem como da geometria do sistema. Na câmara de secagem e para um determinado material, os valores de  $v_{mj}$  diminuem com o aumento do diâmetro da câmara de secagem e com a redução da altura do leito fixo de sólidos (OLIVEIRA et al., 2009). Menos comum, mas, possivelmente, uma alternativa para determinar a velocidade mínima de jorro é a utilização dos desvios padrões das flutuações de pressão (MOSTOUFI; KULAH; KOKSAL, 2015).

## 2.2.4 Secagem em leito de jorro - estado da arte

Devido ao grande interesse e importância na secagem de biomassa visando sua conservação e estabilidade, vários trabalhos sobre o tema relacionado vêm sendo desenvolvidos ao redor do mundo, em seguida, será apresentado brevemente alguns trabalhos que tratam da secagem em leito de jorro.

No trabalho de Marreto (2006) avaliou-se a influência da técnica de secagem em leito de jorro e por spray drying sobre as características e o desempenho de liberação de microcápsulas de caseína-pectina contendo indometacina e paracetamol, após a secagem em leito de jorro, houve uma redução da quantidade de indometacina recuperada a partir das microcápsulas que foi resultado de uma interação fármaco-polímero que ocorre especificamente entre a caseína e a indometacina. Não se observou segregação do fármaco durante a operação de secagem em leito de jorro, e para a avaliação da funcionalidade das microcápsulas obtidas pelas técnicas, os dados gerados junto com a constatação experimental de maior aproveitamento energético na secagem por leito de jorro, permitem considerar que a utilização dessa técnica na secagem de microcápsulas é promissora.

Braga e Rocha (2015) estudaram a secagem em leito de jorro convencional e retangular da polpa de amora com adição de leite. Com base nos ensaios iniciais realizados no secador convencional foram determinadas as melhores condições de operação quanto a temperatura, vazão de alimentação, tipo de inerte e tipo de alimentação. A proporção leite/amora foi fixada inicialmente, sendo concluído que os melhores rendimentos foram obtidos com as partículas de poliestireno, alimentação feita por gotejamento, temperatura de 60°C e 2mL min<sup>-1</sup> de vazão de alimentação. Na segunda parte do estudo, analisou a influência da concentração do leite na mistura alimentada, concluindo que maiores proporções de leite aumenta o rendimento do processo. Foi formulada uma pasta modificada com adição de óleo de palma e caseína, porém a melhor pasta foi a de leite/polpa de amora (25 %:75 % (v/v)), cuja secagem apresentou maior estabilidade fluidodinâmica, melhor desempenho do processo e boa qualidade do produto final, com baixa degradação das antocianinas (inferior a 15 %). Para as secagens realizadas com o leito de jorro retangular com dupla fenda, o autor observou que o aumento da vazão de alimentação e da temperatura apresentaram efeitos negativos para a eficiência de produção de pó. A eficiência de produção para esse novo modelo de secador foi de 77,95 %, empregando-se as



mesmas condições operacionais do secador convencional na proporção de leite-polpa de amora (25 %: 75% (v/v)).

Morais Filho (2013) estudou a aplicação de modelos que descrevam o comportamento do leito de jorro na secagem de pastas e suspensões com alimentação contínua. O modelo gerado foi baseado no modelo CST cuja base teórica é fundamentada nos balanços macroscópicos de calor e massa para as três fases envolvidas no processo (gasosa, líquida e sólida). O trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento da vazão de alimentação, temperatura e vazão do ar de secagem na dinâmica de secagem. Para validação do modelo foram utilizados dados da secagem de leite de cabra e resíduo da acerola. O modelo gerado pelo autor representou bem o processo.

Costa et al. (2015) analisou os efeitos das condições operacionais (temperatura, fluxo de alimentação do ar e concentração de maltodextrina) no conteúdo total de antocianinas, no teor de umidade, no rendimento e qualidade do açaí seco em leito de jorro com partículas inertes de polietileno. Verificou-se que o rendimento do processo foi positivamente influenciado por todas as variáveis estudadas. O aumento da temperatura e fluxo de ar de alimentação promovem elevadas taxas de transferência de calor e de massa, o que contribui para a secagem do açaí, conseqüentemente, aumenta a quantidade de pó produzido. Vale ressaltar ainda, que o aumento da temperatura causou uma redução significativa no teor de umidade, e que o teor de antocianina mostrou variações elevadas, isto porque as antocianinas são instáveis na presença de calor e podem sofrer degradação durante a secagem, foi constatado que todas as variáveis operacionais influenciaram negativamente o conteúdo de antocianina, principalmente, o fluxo de ar. A condição ótima de secagem obtida por meio da análise da função de preferência global, foi de temperatura do ar de secagem de 66°C, fluxo de ar de 12,4 N.m s<sup>-1</sup> e a concentração de maltodextrina de 20,5 % (m/m), nestas condições um pó nutritivo e energético com baixo teor de umidade, alto teor de antocianina foi obtido.

Salikov et al. (2015) realizou a caracterização e modelagem usando o modelo de elementos discretos acoplado com dinâmica de fluido computacional (CFD) de um leito de jorro prismático com duas entradas de gás, com o intuito principal de investigar a influência da taxa de fluxo de ar sobre a dinâmica do leito e estabilidade do jorro. A dinâmica do gás e inertes foram investigados por meio de simulações de diferentes regimes de funcionamento. Resultados satisfatórios entre a simulação e experimental para o fluxo padrão das partículas, expansão do leito e dinâmica das flutuações de pressão de gás foi alcançado, de grande

importância também, foi a determinação das regiões do leito (anular, fonte e jorro) que mostrou as diferentes dinâmicas das partículas em cada região. E que as flutuações de queda de pressão podem ser utilizadas para a identificação do regime de escoamento existente no leito de jorro.

Mostoufi, Kulah e Koksall (2015) observaram as características hidrodinâmicas do leito de jorro cônico pela análise dos sinais de flutuação de pressão. Os experimentos foram realizados em leitos de jorro com três ângulos de cone diferentes (30°, 45°, 60°) com partículas esféricas de alta densidade. E através da análise no domínio de frequência das flutuações de pressão, mostrou-se que os inertes são mais móveis do anel para o bico com um leito de partículas de diâmetro menor e que a transferência de sólidos é mais eficaz e suave do anel para o bico quando o ângulo do cone é menor.

Dieb J. T. (2013) realizaram análises das taxas de evaporação e eficiência térmica em um secador de leito de jorro, onde se verificou que o aumento da vazão de alimentação provocou aumento da taxa de evaporação e da eficiência térmica, temperaturas do ar mais elevadas provocaram a diminuição da eficiência térmica e a taxa de evaporação se mostrou independente deste parâmetro.

Simioni, T. (2015) realizou um estudo acerca da secagem da microalga *Scenedesmus acuminatus* pelas técnicas de camada delgada e leito de jorro, para a secagem em camada delgada dois estudos foram realizados, um envolvendo a parte experimental, e outro envolvendo a modelagem e simulação, utilizando temperatura de 50 e 60 °C e velocidade do ar de secagem de 1 e 2 m s<sup>-1</sup> em ambos os casos. 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<sup>-1</sup>). Os resultados demonstraram que a secagem da biomassa em camada delgada ocorreu principalmente durante o período de secagem a taxa decrescente, sendo que o processo a 60°C e 2 m s<sup>-1</sup> ocorreu no menor tempo (450 min), com os maiores valores de constante de secagem (1,48×10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>) e difusividade efetiva (5,41×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>). No secador em leito de jorro, o experimento com alimentação de 0,45 mL min<sup>-1</sup> foi considerado a melhor alternativa, visto seus elevados valores de recuperação do produto (18,4929 %) e eficiência na produção de pó (86,6992 %), e baixo valor de massa acumulada no leito (0,61054 g).

### 2.2.5 Comsol Multiphysics

As simulações foram realizadas no COMSOL *Multiphysics*, um software de modelagem e simulação fenomenológica de todos os tipos de problemas científicos e de engenharia com base nas equações diferenciais parciais (EDPs) (SANTOS, 2013).

O COMSOL *Multiphysics* compila internamente o conjunto de equações que representam o modelo em sua totalidade, gerando um sistema de equações lineares. A resolução do modelo é obtida por meio do método dos elementos finitos (MEF) (COMSOL, 2015).

A modelagem matemática e simulação da secagem 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.

Para simular o processo de secagem em leito de jorro por completo foi necessário o uso e acoplamento de quatro módulos do software, sendo um para o escoamento do ar na câmara de secagem, outro para a transferência de calor com o meio poroso habilitado e dois para a transferência de massa. No escoamento do ar utiliza-se um fluxo turbulento, que é descrito com as equações de *Navier-Stokes*.

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. A visualização e análise dos resultados referem-se ao pós-processamento (WANG et al., 2011).

A grande maioria dos módulos do COMSOL *Multiphysics* utiliza o método de elementos finitos para montagem e resolução dos modelos (COMSOL, 2015).

### 2.2.6 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é um procedimento numérico utilizado para resolução de sistemas de equações diferenciais parciais (EDP). O método consiste na divisão do domínio da solução em regiões de forma simples ou elementos. Uma solução aproximada para a EDP pode, então, ser obtida para cada um desses elementos. A solução total é gerada juntando as soluções individuais e, ao mesmo tempo, garantindo a continuidade nas fronteiras entre os elementos (CHAPRA; CANALE, 2007).

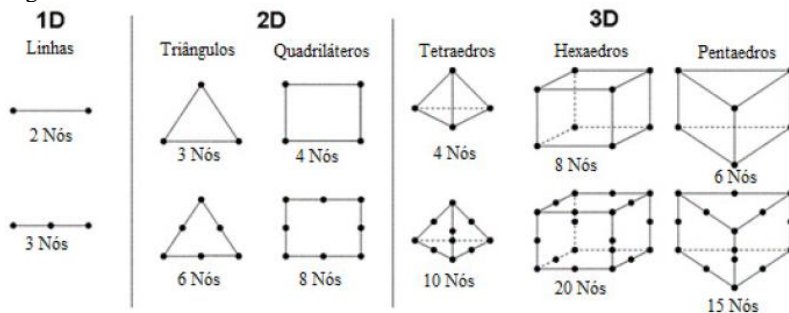
No MEF, os elementos possuem diferentes formas e podem ser retilíneos ou curvos. Além disso, a malha não precisa ser estruturada. As

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).

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, como por exemplo fluxo difusivo, mudam rapidamente (DICKINSON; EKSTRÖM; FONTES, 2014).

Para implementar o MEF inicialmente é realizada a discretização do domínio da solução em  $n$  elementos finitos, os principais elementos finitos utilizados em domínios 1D, 2D e 3D são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Variedade das formas dos elementos finitos.



Fonte: Dickinson, Ekstrom, Fontes, (2014).

Os nodos são os pontos de intersecção das linhas ou planos que formam o elemento, chamadas de linhas ou de planos nodais. A divisão de um domínio em elementos deve satisfazer essencialmente duas regras: dois elementos distintos não devem ser sobrepostos e a malha, que é o conjunto de elementos, deve ser construída na forma mais próxima possível do domínio do problema.

A construção da malha é um passo fundamental para obtenção de soluções mais precisas onde o erro de discretização pode ser reduzido diminuindo o tamanho dos elementos finitos ou utilizando elementos com fronteiras curvadas (DHATT; TOUZOUT; LEFRANÇOIS, 2012).

O passo seguinte do MEF corresponde à montagem, no qual as equações dos elementos individuais são acopladas para caracterizar o

comportamento contínuo do sistema. As equações de cada elemento consistem, matematicamente, de um conjunto de equações algébricas. Esse processo é caracterizado pelo conceito de continuidade, isto é, as soluções para elementos contínuos são combinadas, de modo que os valores desconhecidos nos nodos em comum são equivalentes. Em seguida, as condições de fronteira do sistema são incorporadas e a solução do sistema de equações pode ser obtida com técnicas de resolução de sistemas algébricos. Na etapa final, as soluções obtidas são apresentadas na forma de gráficos e tabelas (CHAPRA; CANALE, 2007).

### **2.2.7 Classificação do escoamento**

Cada escoamento apresenta uma natureza, um comportamento, podendo ser classificado de diversas maneiras. Para realizar estudos sobre dinâmica de fluídos o conhecimento do tipo de escoamento é de fundamental importância. Os escoamentos são diferenciados por diversas características complexas, dentre elas, a geometria, a presença de variações de velocidade e propriedades escalares em todas as direções e também variando no tempo.

A secagem por convecção está sempre associada ao escoamento do ar em torno de um determinado material a secar, responsável pelo transporte convectivo e de massa. Dentre a maioria dos escoamentos que ocorre na natureza e na engenharia, a maioria deles ocorre em regime turbulento (DISCONZI, 2011).

Outra classificação em relação ao escoamento de fluídos, é que pode-se ter escoamentos estacionários ou permanentes que são aqueles cujas grandezas como velocidade e pressão não variam com o tempo, caso contrário, eles são chamados de transientes ou não permanentes. Outra classificação foi proposta em 1883 por Reynolds, em que ele verificou experimentalmente a existência de dois tipos de escoamentos, o laminar e o turbulento (SOUZA, 2009).

Escoamento laminar é aquele no qual o fluído se move em camadas, ou lâminas, uma camada escorregando sobre a outra havendo somente troca de quantidade de movimento molecular. O escoamento turbulento é aquele que apresenta irregularidade no escoamento, onde as partículas apresentam movimento desordenado e macroscópico, ou seja, a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto ao fluído (WEISE e SCHOLL, 2009).

O escoamento laminar ou turbulento descreve o estado em que o fluído se encontra devido às condições do escoamento. Portanto, a natureza de um escoamento, isto é, se laminar ou turbulento e sua posição

relativa referente a uma escala de turbulência é indicada pelo número de Reynolds.

O número de Reynolds expressa a relação entre as forças inerciais ( $F_i$ ), devido a velocidade, e as forças viscosas ( $F_\mu$ ), sendo um parâmetro adimensional, para escoamentos em tubulações o número de Reynolds é obtido através da Equação 2.

$$Re = \frac{\sum F_i}{\sum F_\mu} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Onde:

$\rho$ : densidade do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$v$ : velocidade do escoamento ( $\text{m s}^{-1}$ );

$D$ : diâmetro da tubulação (m);

$\mu$ : viscosidade do fluido ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ).

### 2.2.7.1 Modelos de turbulência k- $\epsilon$

Movimentos turbulentos têm como consequência gerar flutuações instantaneas de velocidade, temperatura e outros escalares, e como resultado destas flutuações, o estado turbulento em um fluido contribui significativamente no transporte de momento, calor e massa, e por isso, têm uma influência determinante nas distribuições destas propriedades no campo de escoamento (SOUZA *et al.*, 2011).

O modelo de turbulência k- $\epsilon$  é o modelo mais comum usado em dinâmica de fluidos computacionais para simular características de fluxos médios para condições de fluxo turbulentas. É um modelo de duas equações, que dá uma descrição geral da turbulência através de duas equações diferenciais e utiliza diretamente as equações de transporte das quantidades turbulentas. É geralmente útil pra fluidos que escoam com gradiente de pressão relativamente pequenos (AHSAN, 2014).

No modelo de turbulência k- $\epsilon$ ,  $k$  é a energia cinética de turbulência e é definida como a variação das flutuações em velocidade, e  $\epsilon$  é a dissipação do redemoinho de turbulência, que expressa a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam. O fluxo turbulento k- $\epsilon$  de interface, pode ser utilizado para análises em regime transiente ou estacionário (COMSOL, 2015).

No trabalho realizado o modelo de turbulência utilizado é o k- $\epsilon$  descrito no regime estacionário, onde a modelagem da turbulência utiliza a simulação numérica de escoamentos turbulentos via equações médias

de Reynolds (RANS). As equações da técnica RANS são obtidas através de um conjunto de médias das equações do Navier-Stokes e da continuidade. O elemento crítico da modelagem RANS é a representação das tensões de Reynolds ou tensões turbulentas que descrevem os efeitos das flutuações turbulentas de pressão e velocidades.

## 2.2.8 Analogia da transferência de massa, energia e momento

Nesta seção serão apresentadas analogias importantes para entender e relacionar os fenômenos de transferência, pois há semelhanças nos seus mecanismos. Essas analogias são úteis na compreensão dos fenômenos de transferência e são meios satisfatórios para prever o comportamento dos sistemas para os quais não se possui dados quantitativos disponíveis (WELTY et al., 2008).

### 2.2.8.1 Analogia de Reynolds

O primeiro reconhecimento do comportamento análogo da transferência de momento e energia foi postulado por Reynolds, que mostrou que nas situações onde a camada limite térmica possui a mesma espessura da camada limite hidrodinâmica, ou seja, o número de Prandtl (Pr) é unitário, tem-se (WELTY et al., 2008):

$$\frac{h_c}{\rho u C_p} = \frac{C_f}{2} = S_t \quad (3)$$

Onde:

$h_c$ : coeficiente convectivo de transferência de calor ( $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{°C}^{-1}$ );

$\rho$ : densidade do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$u$ : velocidade do fluido ( $\text{m s}^{-1}$ );

$C_f$ : coeficiente de atrito do fluido;

$C_p$ : calor específico do fluido ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$S_t$ : número de Staton.

O postulado de Reynolds pode ser estendido para casos em que o número de Schmidt ( $Sc$ ) é unitário, isto quer dizer que a camada limite mássica e a hidrodinâmica possuem a mesma espessura, que resulta:

$$\frac{k_m}{u_\infty} = \frac{C_f}{2} \quad (4)$$

Onde:

$k_m$ : coeficiente convectivo de transferência de massa (m/s);  
 $u_\infty$ : densidade do fluido ( $m\ s^{-1}$ ).

Portanto a analogia de Reynolds pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{h_c}{\rho u C_p} = \frac{k_m}{u} = \frac{C_f}{2} \quad (5)$$

Quando ao uso da analogia representada pela Equação 5 tem-se que a mesma é válida na ausência de formas de forças de arraste, como é o caso de escoamento em paralelo sobre placas planas e escoamento no interior de condutos e para situações em que o número de Schmidt e de Prandtl forem unitários (WELTY et al., 2008).

### 2.2.8.2 Analogia de Chilton-Colburn

Chilton e Colburn em 1934 a partir de experimentos realizados modificaram a analogia de Reynolds, para que não tivesse a restrição do número de Schmidt e Prandtl unitário, eles definiram o fator  $j_D$  para a transferência de massa com base em dados recolhidos tanto no regime de fluxo laminar quanto no turbulento como sendo:

$$j_D = \frac{k_m}{u} Sc^{2/3} = \frac{C_f}{2} \quad (6)$$

E a relação do fator  $j_H$  para o transporte de calor,

$$j_H = StPr^{2/3} = \frac{C_f}{2} \quad (7)$$

A analogia Chilton-Colburn que relaciona todos os três tipos de transporte em uma expressão é aplicável em placas planas e é satisfatório para sistemas com outras geometrias quando nenhuma forma de arrasto está presente.

$$j_H = j_D = \frac{C_f}{2} \quad (8)$$

Para sistemas em que se apresentam formas de arrasto a analogia para o transporte de calor ( $j_H$ ) e transporte de massa ( $j_D$ ) continua igual e



válida, mas o termo de transporte da quantidade de movimento ( $C_f/2$ ) não é aplicável, assim a Equação 8 fica da seguinte maneira:

$$j_H = j_D \neq \frac{C_f}{2} \quad (9)$$

Ou,

$$\frac{h_c}{\rho C_p} Pr^{2/3} = k_m Sc^{2/3} \quad (10)$$

Onde:

$h_c$ : coeficiente convectivo de transferência de calor ( $J s^{-1} m^{-2} ^\circ C^{-1}$ );

$\rho$ : densidade do fluido ( $kg m^{-3}$ );

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

$C_p$ : calor específico do fluido ( $J kg^{-1} K^{-1}$ );

$Pr$ : número de Prandtl;

$Sc$ : número de Schmidt;

A Equação 10 relaciona o calor por convecção e transferência de massa, isto permite a determinação de um coeficiente de transferência desconhecido a partir de informações obtidas do outro fenômeno de transferência, sendo válida para gases e líquidos no intervalo de  $0,6 \leq Pr \leq 100$  e  $0,6 \leq Sc \leq 2500$  (WELTY et al., 2008).



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a realização deste trabalho, cujo o foco é secagem da pasta de microalgas, através da técnica de leito de jorro. No que se refere a técnica de secagem, foi realizado primeiramente um estudo experimental e posteriormente a modelagem e simulação dos fenômenos de escoamento, de transferência de calor e de massa, reproduzidos com os dados da planta piloto, para que os resultados obtidos com a simulação se aproximassem ao máximo do estudo experimental. Como existem três espécies envolvidas na secagem, que são o ar de secagem, a água e a espécie sólida (microalga seca), existe uma complexidade devido os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem durante a secagem, trata-se sem dúvida de um desafio em termos de modelagem e simulação.

Primeiramente é descrito o funcionamento da unidade experimental de secagem em leito de jorro, onde utilizou-se a temperatura de 60°C, com testes envolvendo diferentes vazões de alimentação da pasta (0,25, 0,45, 0,60 e 0,8 mL min<sup>-1</sup>). Em seguida, se estabelecem as equações governantes do escoamento, transferência de calor e de massa no ar.

#### 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). A microalga utilizada é do gênero *Scenedesmus acuminatus* e foi cultivada em um sistema do tipo tanque circular aberto, com capacidade variando entre 3000 e 5000 L, operando em condições ambientais de luminosidade e temperatura. A biomassa foi centrifugada em um equipamento *Sharples S16*, operando a 6000 vezes a força gravitacional, a umidade inicial da pasta de microalga em base úmida é de 73 %.

##### 3.1.1 Caracterização da biomassa de microalga

Foram feitas análises de massa específica *bulk* ( $\rho_{b,pm}$ ), massa específica aparente ( $\rho_{ap,pm}$ ), e teor umidade ( $X_{bu}$ ) para caracterização da biomassa de microalga.

A massa específica *bulk* ( $\rho_{b,pm}$ ) pode ser entendida como a relação entre a massa de pasta seca e o volume ocupado por esta quantidade de material. Onde os espaços vazios entre as partículas e os poros internos são considerados no volume total do material (OLIVEIRA et al, 2009).

Assim, utilizou-se da Equação 11 para obtenção desta grandeza. Utilizou-se para a pesagem das amostras uma balança analítica com precisão de 4 casas decimais.

$$\rho_{b,pm} = \frac{m_{pms}}{V_{recp}} \quad (11)$$

Onde:

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

$V_{recp}$ : volume do recipiente ( $m^3$ ).

A massa específica aparente da pasta de microalga foi determinada pelo método de deslocamento de fluido em picnômetro, segundo norma n° 985.19 da *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC). Assim, a  $\rho_{ap,pm}$  foi determinada através da Equação 12 (AOAC apud OLIVEIRA et al., 2009).

$$\rho_{ap,pm} = \frac{m_{pm}}{V_{pic} - \left( \frac{m_t - m_{pm} - m_{pic}}{\rho_A} \right)} \quad (12)$$

Onde:

$m_{pm}$ : massa de pasta de microalga (kg);

$V_{pic}$ : volume do picnômetro ( $m^3$ );

$m_t$ : massa total (kg);

$m_{pic}$ : massa do picnômetro (kg);

$\rho_A$ : massa específica da água ( $kg\ m^{-3}$ ).

O teor de umidade é um 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 13), ou base úmida ( $X_{bu}$ ) quando a determinação for feita em relação à massa total do produto (Equação 14).

$$X_{bs} = \frac{m_A}{m_{ms}} \quad (13)$$

$$X_{bu} = \frac{m_A}{m_{mu}} \quad (14)$$

Onde:

$m_A$ : massa de água no material (kg);

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

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

Seguindo a metodologia proposta por Dissa et al (2010) para determinar o teor de umidade inicial da pasta de microalga, uma determinada quantidade da massa da pasta úmida foi pesada e colocada em uma estufa, operando a temperatura de 70°C, durante 24 horas, após mediu-se a massa de água retirada da pasta e utilizando a Equação 14 o teor de umidade inicial foi determinado. Para injetar a pasta de microalga fez-se uso da bomba injetora, essa pasta precisou ser diluída para facilitar o escoamento no sistema de alimentação, para padronizar a técnica experimental a umidade da pasta utilizada foi de 82%.

### 3.2 SECAGEM EM LEITO DE JORRO

A metodologia adotada para a secagem em leito de jorro é descrita abaixo, onde inicialmente é apresentada a unidade experimental junto com as partículas inertes, mostrando o funcionamento da mesma e posteriormente são descritos os procedimentos e parâmetros empregados durante os experimentos, que envolvem os ensaios de secagem e a caracterização da unidade experimental. Posteriormente será descrita a modelagem do processo de secagem em leito de jorro.

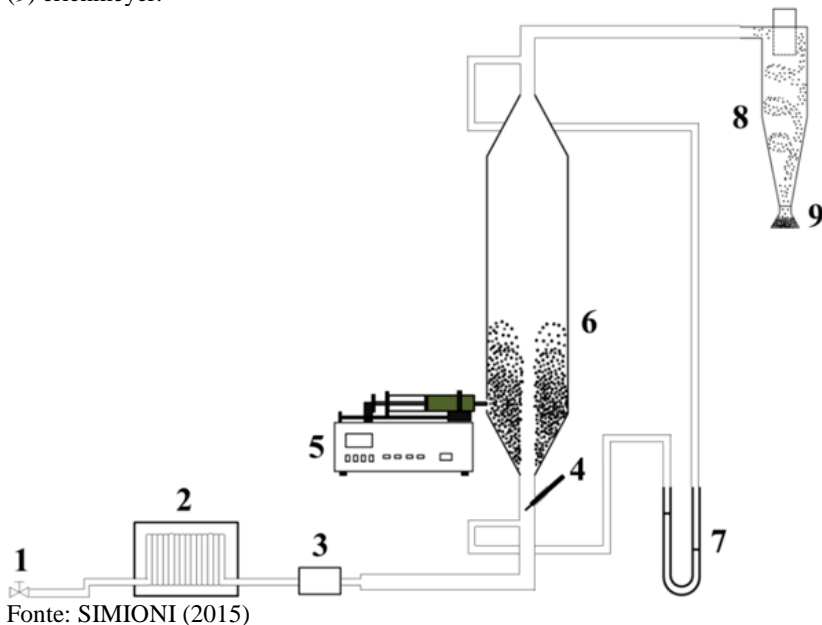
#### 3.2.1 Estudo experimental

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

##### 3.2.1.1 Descrição da unidade experimental

A unidade experimental para obtenção dos dados da secagem em leito de jorro foi desenvolvida em um trabalho anterior, no Laboratório de Meios Porosos (LASIPO-UFSC), conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama esquemático da unidade experimental de leito de jorro (1) Entrada de ar; (2) Banho Ultratermostático; (3) rotâmetro; (4) termômetro; (5) bomba injetora; (6) câmara de secagem; (7) manômetro de tubo em U; (8) ciclone; (9) erlenmeyer.



O funcionamento da unidade experimental consiste inicialmente na injeção de ar comprimido (1) vindo de um compressor à temperatura ambiente, em seguida este ar de secagem passa por um banho ultra termostático (2) com controlador digital onde é aquecido até uma temperatura de 60 °C. A vazão de ar é medida por um rotâmetro (3) modelo SD6050, marca IFM *eletronic*, antes de ser inserida na câmara de secagem. Para certificação e controle durante o processo de secagem, um termômetro (4) é colocado na tubulação de vazão de entrada de ar. A alimentação da pasta de microalga à temperatura ambiente é realizada por uma bomba injetora (5) com auxílio de uma seringa contendo a pasta de microalgas, esta pasta é inserida na câmara de secagem (6) que 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, e 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. Como existe variação da velocidade de entrada do ar, então existe um diferencial de pressão durante a secagem que é verificado

com um manômetro de tubo em U (7) contendo mercúrio com pontos de medição na entrada e saída desta câmara de secagem. A microalga seca no decorrer do experimento é encaminhada para a parte superior da câmara e passa por um ciclone tipo *Lappler* (8) e é coletada em um *erlenmeyer* (9) para posterior pesagem, para acompanhamento da massa de microalga seca.

### 3.2.1.2 Procedimento experimental

Diferentes vazões de alimentação da biomassa (0,25, 0,45, 0,60, 0,8 mL min<sup>-1</sup>) foram injetadas na câmara de secagem, esta variação teve 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. Sendo assim, este foi o único parâmetro variado durante os experimentos. A velocidade do ar de entrada foi mantida na faixa de 10 % acima da velocidade mínima de jorro, para garantir a estabilidade do regime, e a temperatura do ar foi mantida em 60 °C. A determinação da umidade e da temperatura de saída do ar com o tempo foi medida com o auxílio de um termo higrômetro (LOGBOX – RHT-LCD).

A massa da pasta seca foi contabilizada em intervalos de 5 minutos até uma hora e depois a cada 10 minutos até o final da secagem, onde a quantidade de pasta injetada em cada seringa foi de 20,6 g, sendo que foram injetadas 6 seringas, contabilizando uma massa de pasta total injetada de 123,6 g. As seringas eram trocadas imediatamente após o término da anterior a fim de se alcançar o regime permanente, estado em que a quantidade que fosse injetada fosse equivalente a quantidade que saia da câmara de secagem. A secagem se encerrava quando não mais fosse observada presença de pó no ciclone, e quando não houvesse variação da massa medida com o tempo, indicando de tal maneira o final da mesma.

No final de cada experimento, a umidade do pó seco obtido em cada experimento foi obtida medindo uma porção da massa final do respectivo *erlenmeyer* que foi colocada em uma placa de vidro e inserida em uma estufa à 70 °C por 24 horas, posteriormente a massa seca foi medida e a umidade do pó seco em base úmida e base seca foi obtida, para segurança dos resultados, realizou-se o procedimento em duplicata.

A determinação da eficiência do ciclone foi obtida colocando um algodão sobre a saída, a uma distância de 5 centímetros da saída do ciclone para que o pó que é perdido ficasse acumulado no algodão, depois o algodão foi para a estufa à 70 °C por 24 horas e a massa foi medida,

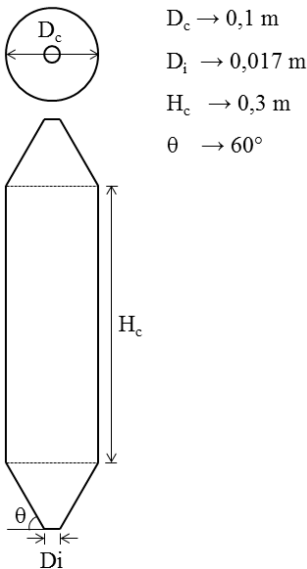
após determinou-se a eficiência do ciclone relacionando a massa de pó coletada com a massa de pó perdida.

Para cada novo experimento efetuava-se a limpeza dos equipamentos da secagem em leito de jorro e as partículas inertes eram substituídas por novas partículas, para garantir que a transferência de calor e massa não fossem prejudicadas.

### 3.2.1.3 Geometria da câmara de secagem

De acordo com Mathur e Epstein (1974), a qualidade e estabilidade do regime de jorro estabelecido dependem da geometria da câmara de secagem. Os detalhes das dimensões da câmara de secagem são apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Dimensões da câmara de secagem.



Fonte: SIMIONI, (2015).

### 3.2.1.4 Caracterização da unidade experimental

Conforme a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974) realizou-se a caracterização da unidade experimental que consistiu na obtenção de curvas fluidodinâmicas do leito de jorro. Para realização desta caracterização, adicionou-se na câmara de secagem apresentada na



Figura 9 uma massa de inertes até uma altura de 8 cm a partir da base inferior do leito da câmara de secagem, escolheu-se este valor baseado em testes anteriores realizados. 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 reduzida, até ser zerada.

Nos experimentos relatados acima, a queda de pressão registrada foi causada não apenas pelo leito de partículas inertes, mas também pelo bocal de entrada de ar do 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. Os valores obtidos foram descontados da queda de pressão total, resultando na queda de pressão causada somente pelo leito de partículas inertes.

Com os experimentos realizados, foram coletados os dados da queda de pressão no leito e da vazão do ar.

$$Q_{ar} = v_{ar}A_{ar} \quad (15)$$

Onde:

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

$v_{ar}$ : velocidade de escoamento do ar ( $m s^{-1}$ );

$A_{ar}$ : área do de escoamento do ar ( $m^2$ ).

### 3.2.2 Descrição e caracterização das partículas inertes (EVA)

Para promover uma maior transferência de calor e massa no equipamento de leito de jorro utilizou-se partículas inertes, para a realização dos experimentos, estas constituíram-se do copolímero etileno-acetato de vinila (EVA).

Para obtenção de um diâmetro uniforme das partículas de EVA, utilizou-se um conjunto de peneiras, onde os inertes utilizados nos experimentos foram os que ficaram retidos entre as peneiras de 6 mesh (3,36 mm) e 7 mesh (2,83 mm).

A partícula inerte foi assumida com esfericidade unitária, e sua área superficial e volume são calculadas pelas Equações (16) e (17) respectivamente.

$$A_{sup,i} = 4\pi r^2 \quad (16)$$

$$V_i = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (17)$$

Onde:

$r_i$ : raio da partícula inerte (m);

O número de partículas inertes ( $n_{part,i}$ ) presentes na câmara de secagem é determinado pela equação:

$$n_{part,i} = \frac{(V_{cone} + V_{cil,i})(1 - \varepsilon_{EVA})}{V_i} \quad (18)$$

Sendo,

$$V_{cone} = \frac{\pi R^2 h_1}{3} \quad (19)$$

$$V_{cil,i} = \pi R^2 h_2 \quad (20)$$

Onde:

$V_{cone}$ : Volume da região cônica na câmara de secagem (m<sup>3</sup>);

$V_{cil,i}$ : Volume da região cilíndrica com os inertes na câmara de secagem (m<sup>3</sup>);

$\varepsilon_{EVA}$ : porosidade média do leito estático

$R$ : raio da câmara de secagem (m);

$h_1$ : altura total da região cônica da câmara de secagem (m);

$h_2$ : altura dos inertes na região cilíndrica na câmara de secagem (m).

Utilizando a metodologia proposta por Adeodato (2003) a massa específica volumétrica e aparente foram determinadas.

A massa específica *bulk* do leito de partículas ( $\rho_{b,EVA}$ ) expressa a relação entre a massa das partículas de EVA 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 a determinação utilizou-se uma proveta graduada de 50 ml, onde ( $\rho_{b,EVA}$ ) é determinado a partir da Equação 21:

$$\rho_{b,EVA} = \frac{m_{EVA}}{V_{recp}} \quad (21)$$

Onde:

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

$V_{recp}$ : volume do recipiente ( $m^3$ ).

Com a utilização de um picnômetro calibrado, a massa específica aparente da partícula ( $\rho_{ap,EVA}$ ) foi determinada pelo método de deslocamento de líquido, o fluido utilizado foi água destilada. ( $\rho_{ap,EVA}$ ) é definida como a razão entre a massa e o volume total da partícula, incluindo o volume que os poros ocupam conforme a Equação 22.

$$\rho_{ap,EVA} = \frac{m_{EVA}}{V_{pic} - \frac{m_A}{\rho_A}} \quad (22)$$

Onde:

$m_A$ : massa de água (kg);

$\rho_A$ : massa específica da água ( $kg\ cm^{-3}$ );

$V_{pic}$ : volume do picnômetro ( $m^3$ ).

Colocou-se em provetas de 50 e 100 ml uma quantidade de partículas que preenche-se esse volume e em seguida foi adicionado água até a altura ocupada pelas partículas. Assim, a porosidade média do leito estático ( $\varepsilon_{EVA}$ ) que expressa a razão entre o volume de água utilizado e o volume ocupado pelas partículas de EVA pode ser determinada.

$$\varepsilon_{EVA} = 1 - \frac{V_A}{V_{EVA}} \quad (23)$$

Onde:

$V_A$ : volume de água ( $m^3$ );

$V_{EVA}$ : volume ocupado pelas partículas de EVA ( $m^3$ ).

Com o intuito de representar os inertes nas simulações durante a secagem utilizou-se as propriedades de densidade e viscosidade efetiva, que trata o sistema ar-inerte com propriedades efetivas.

Para determinação da viscosidade efetiva, utilizou-se as correlações apresentadas na Tabela 1 que se referem a fluidodinâmica da partícula isométrica isolada em fluido newtoniano e são válidas no regime de Stokes com Reynolds menor que 0,5.

Tabela 1 – Correlações fluidodinâmicas da partícula isométrica.

<b>Parâmetro</b>	<b>Equação</b>	<b>Referência</b>
<b>Constante</b> $k_1$	$k_1 = 0,843 \log_{10} \left( \frac{\phi}{0,065} \right)$	Pettyjonh e Chistiansen (1948) <i>apud</i> Massarani (2001)
<b>Coefficiente de arrasto (C<sub>D</sub>)</b>	$C_D = \frac{24}{k_1 Re}$	Pettyjonh e Chistiansen (1948) <i>apud</i> Massarani (2001)
<b>Velocidade terminal</b>	$v_t = \frac{(\rho_S - \rho_F) g D^2}{18\mu}$	Berker (1963) <i>apud</i> Massarani (2001)

Fonte: Adaptado Massarani (2001).

A viscosidade efetiva ( $\mu_{ef}$ ) é calculada através da Equação 24 (MASSARANI, 2001).

$$\mu_{ef} = \frac{D_p v_t \rho_f}{Re} \quad (24)$$

O valor da viscosidade efetiva ( $\mu_{ef}$ ) foi obtido a partir da Equação 24 e os demais parâmetros estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros utilizadas para determinar a viscosidade efetiva.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
$K_1$	1	Adimensional
Re	0,24	Adimensional
$v_t$	0,0099	[m s <sup>-1</sup> ]
$C_D$	99,01	Adimensional
$\mu_{ef}$	0,05	[Kg m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Para determinação da densidade efetiva ( $\rho_{ef}$ ) que representa o sistema particulado, utilizou-se a equação geral de Ergun (Equação 25) para determinar a perda de carga ocasionada com o leito expandido que representa a queda de pressão do sistema particulado, então nas

simulações realizadas determinou-se o valor da densidade efetiva que gerasse a mesma perda de carga obtida a partir da Equação 25 (MASSARANI, 2001).

$$\Delta P = \frac{150\mu_{ef}vL(1-\varepsilon)^2}{D_p^2\varepsilon^3} + \frac{1,75\rho_f v^2 L(1-\varepsilon)^2}{D_p\varepsilon^3} \quad (25)$$

Os valores da queda de pressão e da densidade efetiva são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Valores da queda de pressão e da densidade efetiva.

Parâmetro	Valor	Unidade
$\Delta P$	79	[Pa]
$\rho_{ef}$	12.12	[kg m <sup>-3</sup> ]

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

As propriedades térmicas do EVA foram extraídas de Ngo, Jeon e Byon, (2016), e estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores da condutividade térmica e calor específico do EVA.

Propriedade	Valor	Unidade	Referência
Condutividade térmica	0,34	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Ngo, Jeon e Byon, (2016)
Calor específico	1400	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Ngo, Jeon e Byon, (2016)

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

### 3.2.3 Propriedades termo-físicas da microalga

Billier e Ross (2014) determinaram a composição bioquímica de microalgas utilizando a técnica de pirólise GC-MS. Para a espécie *Scenedesmus obliquus* cultivada em fotobiorreatores abertos do tipo “raceway” a análise bioquímica levando em conta o teor de cinzas da espécie foi determinado, como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Constituição da microalga considerada nas simulações

Constituinte	Porcentagem
Proteínas	42 %
Carboidratos	25 %
Lipídios	21 %
Cinza	12 %

Fonte: Biller e Ross (2014).

As propriedades termo-físicas foram determinadas seguindo a proposta de Choi e Okos que desenvolveram em 1986, modelos matemáticos capazes de determinar as propriedades térmicas dos principais componentes presentes nos alimentos em função da sua temperatura. Estas equações são apresentadas nas Tabelas 6,7,8, e são válidas para temperaturas entre 0 e 150°C (APRAJEETA; GOPIRAJAH; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2015; RAO et al., 2014).

Para determinar a massa específica do meio poroso ( $\rho_p$ ) de alimentos, Choi e Okos (1986) apud RAO et al. (2014) desenvolveram uma expressão em função da composição bioquímica.

$$\frac{1}{\rho_p} = \sum \frac{x_i}{\rho_i} \quad (27)$$

Onde:

$\rho_p$ : massa específica do meio poroso ( $\text{kg m}^{-3}$ );

A massa específica de cada componente, por sua vez, pode ser determinada seguindo as relações apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Expressões para a determinação da massa específica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura.

Componente	$\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )
Água	$997,18 + 3,1439 \times 10^{-3}T - 3,7574 \times 10^{-3}T^2$
Proteína	$1329,9 - 5,1840 \times 10^{-1}T$
Lipídio	$925,59 - 4,1757 \times 10^{-1}T$
Carboidrato	$1599,1 - 3,6589 \times 10^{-1}T$
Cinza	$2423,8 - 2,8063 \times 10^{-1}T$

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

A capacidade calorífica do meio poroso foi calculada segundo a Equação 28 (CHOI e OKOS, 1986 apud RAO et al., 2014).

$$C_{p,p} = \sum x_i C_{pi} \quad (28)$$

Onde:

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

$x_i$ : fração mássica dos componentes;

$C_{pi}$ : capacidade calorífica dos componentes ( $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ).

A capacidade calorífica dos componentes em questão pode ser calculada através das expressões apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Expressões para a determinação da capacidade calorífica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura.

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

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

Utilizando a Equação 29 a condutividade térmica pode ser calculada (CHOI e OKOS, 1986 apud RAO et al., 2014).

$$k_p = \sum x_i k_i \quad (29)$$

Onde:

$\kappa_p$ : condutividade térmica do meio poroso ( $W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ );

$x_i$ : fração mássica dos componentes;

$\kappa_i$ : condutividade térmica dos componentes ( $W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ).

Para determinar a condutividade térmica em função dos componentes utilizou-se as expressões apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Expressões para a determinação da condutividade térmica de diferentes componentes, com relação à sua temperatura.

Componente	$\kappa$ ( $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
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).

Krokida e Maroulis (1997) utilizaram a Equação 30 para determinar a porosidade da pasta de microalga ( $\varepsilon_{pm}$ ).

$$\varepsilon_{pm} = 1 - \frac{\rho_{b,pm}}{\rho_p} \quad (30)$$

Onde:

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

$\rho_p$ : massa específica do meio poroso ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

Para uma melhor visualização dos valores encontrados, a Tabela 9 foi construída mostrando os valores das propriedades citadas anteriormente para a temperatura de 60°C.

Tabela 9 - Propriedades da microalga considerada nas simulações.

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa específica do meio poroso ( $\rho_p$ )	1307,3	( $\text{kg m}^{-3}$ )
Capacidade calorífica do meio poroso ( $C_{p,p}$ )	1857,5	( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
Condutividade térmica do meio poroso ( $k_p$ )	0,220	( $\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
Porosidade da pasta de microalga ( $\varepsilon_{pm}$ )	0,66	
Massa específica <i>bulk</i> da pasta de microalga ( $\rho_{b,pm}$ )	688,55	( $\text{kg m}^{-3}$ )

Fonte: Desenvolvido pelo autor.



### 3.2.4 Avaliação do desempenho do processo de secagem

Em relação ao pó seco, a sua massa específica aparente ( $\rho_{ap,pó}$ ) foi determinada utilizando o método de deslocamento de líquido (Equação 31), utilizando um picnômetro calibrado.

$$\rho_{ap,pó} = \frac{m_{pó}}{V_{pic} - \frac{m_A}{\rho_A}} \quad (31)$$

Onde:

$m_{pó}$ : massa de pó (kg);

$m_A$ : massa de água (kg);

$\rho_A$ : massa específica da água ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$V_{pic}$ : volume do picnômetro ( $\text{m}^3$ ).

A avaliação do desempenho da secagem em leite de jorro foi realizada através da massa acumulada na câmara de secagem ( $m_{ac}$ ), taxa de recuperação do produto ( $R_p$ ) e eficiência na produção de pó ( $\eta_{pó}$ ).

A massa acumulada na câmara de secagem foi determinada através de um balanço de massa, apresentado pela Equação 32.

$$m_{ac} = \frac{m_i - (m_i X_{bu,i}) - m_{pó,p} + (m_{pó,p} X_{bu,pó})}{1 - X_{bu,ac}} \quad (32)$$

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 ( $\text{g água g de pasta de microalga}^{-1}$ );

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

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

$X_{bu,ac}$ : umidade da massa acumulada no leite, em base úmida ( $\text{g água g de material acumulado no leite}^{-1}$ ).

Para determinação da taxa de recuperação do produto utilizou-se a Equação 33 (DOTTO et al., 2011).

$$R_p = \frac{m_{pó,p}(1 - X_{bu,pó})}{m_i} \cdot 100 \quad (33)$$

Onde:

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

$X_{bu,pó}$ : umidade do pó produzido, em base úmida (g água g<sup>-1</sup> de pó);

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

A eficiência na produção de pó foi determinada através da Equação 34 (MEDEIROS et al., 2004).

$$\eta_{pó} = \frac{m_{pó,p}(1 - X_{bu,pó})}{m_i(1 - X_{bu,i})} \cdot 100 \quad (34)$$

Onde:

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

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

$m_i$ : 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<sup>-1</sup>).

Com a relação da massa total de pó produzida pelo tempo total do processo de secagem a estimativa de pó seco por unidade de tempo é obtida.

### 3.2.5 Estudo computacional

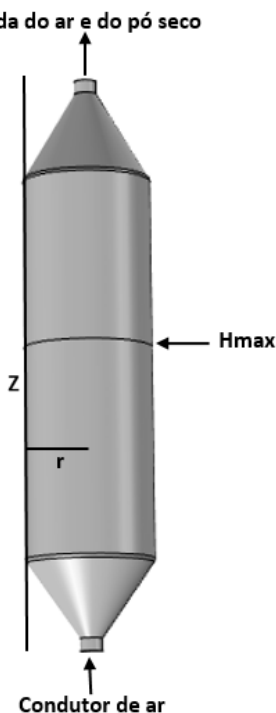
A modelagem fenomenológica e a simulação foram realizadas em um primeiro momento considerando os aspectos da fluidodinâmica do ar de secagem com a presença das partículas inertes em estado estacionário, descrevendo desta maneira o escoamento. Em um segundo passo, adicionou-se de forma acoplada e transiente os fenômenos de transferência de calor e massa referentes à secagem. 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 transferência de calor e massa, são respectivamente, *Heat transfer in fluids* e *Transport of Diluted Species*.

#### 3.2.5.1 Geometria e malha de discretização

Um modelo em duas dimensões (2D) axissimétrico foi utilizado para descrever os fenômenos convectivos e difusivos envolvidos na secagem da pasta de microalga em leite de jorro. Pode ser observado na Figura 10 o domínio computacional do problema em questão em 3D, que

possui um orifício de entrada na parte inferior (conductor de ar) para o ar de secagem, e um orifício de saída na parte superior (saída do ar e do pó seco) para o pó que é produzido e o ar que deixa a câmara de secagem, e ( $H_{\max}$ ) representa a altura máxima que os inertes atingem, vale ressaltar, que a alimentação da pasta foi inserida na câmara como um termo de geração.

Figura 10 - Domínio computacional em 3D.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

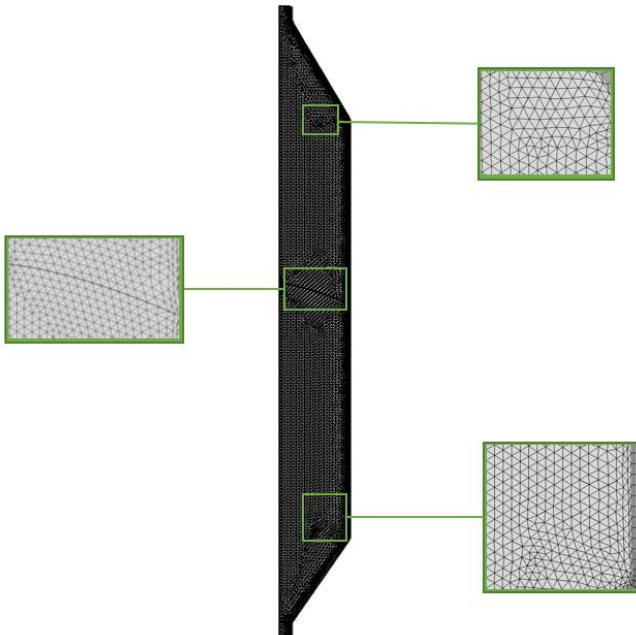
As dimensões apresentadas na Figura 11 são iguais as dimensões da câmara de secagem utilizadas experimentalmente, onde  $r$  representa o raio e é igual a 0,05m e  $z$  representa a altura da câmara de secagem, com valor de 0,45m. O conductor de ar é composto por um bocal de entrada de 0,017m de diâmetro e a saída do ar e pó seco possui a mesma dimensão. A altura máxima que os inertes atingem ( $H_{\max}$ ) é de 0,252m e a altura de ambas as regiões cônicas é de 0,065m.

De acordo com Dickinson et al. (2014) o método de elementos finitos, assim como qualquer método numérico discreto para resolução de EDP's contínuas introduz erro numérico, e para minimizar estes erros é necessária a utilização de uma malha adequada.

A malha é obtida através da discretização do domínio para a integração das equações de continuidade, quantidade de movimento e energia. No método de elementos finitos que foi utilizado neste estudo, a construção da malha é uma etapa fundamental que influencia para a correta convergência da simulação.

Para resolver o sistema de equações diferenciais que descrevem o problema em estudo, uma malha foi gerada para a resolução numérica dessas equações (Figura 11). A malha foi criada levando-se em conta requisitos como a convergência, representação adequada da geometria, custo computacional e tipo de escoamento, a fim de representar de maneira mais aproximada quanto possível a unidade experimental de secagem, e assim obter melhores resultados.

Figura 11 - Malha gerada para a simulação.



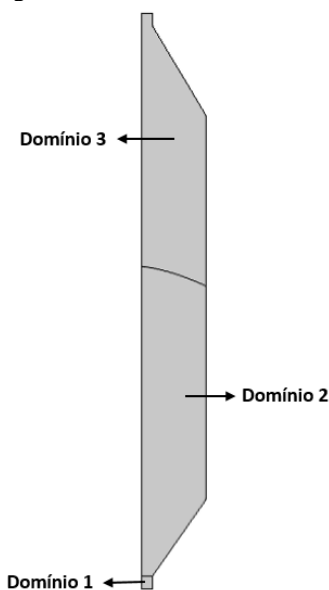
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A malha de refinamento possui 9211 elementos, dos quais 7846 são elementos triangulares e 1365 são elementos quadriláteros com qualidade média de 0,8343, com 7 camadas de espessura 0,0025m próximas a parede da câmara de secagem.

### 3.2.5.2 Modelagem fenomenológica

Na Figura 12 são apresentados os domínios considerados no modelo desenvolvido.

Figura 12 – Domínios do modelo desenvolvido.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O domínio 2 apresentado na Figura 12 é o domínio poroso que representa a região com as partículas inertes de EVA, nos domínios 1 e 3 tem-se o escoamento do ar.

O escoamento no regime turbulento é descrito em todos os domínios apresentados. Para representar a transferência de calor na câmara de secagem é utilizada a física transferência de calor em fluídos, com a transferência de calor no ar que ocorre nos domínios 1 e 3, e para a transferência de calor no domínio 2 o meio poroso é habilitado.

Para a transferência de massa são utilizadas duas físicas de transporte de espécies diluída, a primeira física descrita somente no domínio 2 onde não há atuação da convecção, representa a pasta que é injetada e permanece aderida temporariamente aos inertes, sobreposta a esta física é adicionada a outra física, que atua em todos os domínios com convecção presente e representa as espécies que são formadas.

As hipóteses adotadas para a modelagem do processo de secagem convectiva e difusiva da pasta de microalga foram:

- i. o efeito de encolhimento da biomassa e da partícula inerte devido à secagem não foi considerado;
- ii. o escoamento é incompressível em regime turbulento;
- iii. ar é considerado como gás ideal.
- iv. coordenadas cilíndricas;
- 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. não há presenças de fontes externas;
- vii. qualquer escopo de radiação foi assumido como negligenciável;
- viii. a transferência de massa no interior da pasta de microalga ocorre apenas por difusão;
- ix. as partículas inertes foram assumidas com esfericidade unitária;

Os fenômenos envolvidos na secagem da pasta de microalga são representados pelos modelos de transferência de calor e de massa. A transferência de calor entre fluidos é usada para especificar as propriedades térmicas da matriz porosa. A transferência de massa é modelada através da física de transporte de espécies.

### 3.2.5.2.1 Modelagem do escoamento do ar

Para modelagem do ar utilizou-se o modelo de escoamento *Turbulent flow, k-ε Interface*, este modelo é usado para controlar a interface entre dois fluidos imiscíveis.

A interface física empregada para a simulação do escoamento resolve as equações de *Navier-Stokes* para conservação da quantidade de movimento e a equação da continuidade para a conservação de massa.

As principais equações envolvidas são apresentadas pela Equação 35 que representa a conservação de massa e pela Equação 36 que é uma equação vetorial e representa a conservação da quantidade de movimento:

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (35)$$

$$\rho u \cdot \nabla u = \nabla \cdot [-pI + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \quad (36)$$

Onde:

$\rho$ : massa específica do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$\mu$ : viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ );

$\mu_T$ : viscosidade turbulenta ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ );

$I$ : vetor identidade;

$u$ : vetor velocidade ( $\text{m s}^{-1}$ );

$F$ : força gravitacional ( $\text{N m}^{-3}$ ).

Neste estudo foi utilizado o modelo de turbulência  $k$ - $\varepsilon$ , um modelo de turbulência padrão que é o mais amplamente utilizado e aceito para simulações computacionais por apresentar uma boa convergência.

#### a) Modelo de Turbulência $k$ - $\varepsilon$

É um modelo semi empírico, que é regido por dois parâmetros,  $k$  relacionado à energia cinética turbulenta (definida como a variação das flutuações na velocidade) e  $\varepsilon$  relacionado à energia de dissipação da energia cinética turbulenta (a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam (HEUERT et al., 2007).

A viscosidade turbulenta que inclui os parâmetros  $k$  e  $\varepsilon$  é utilizada para modelar as tensões turbulentas. No regime estacionário, os valores destes parâmetros,  $k$  e  $\varepsilon$ , são obtidos diretamente das equações diferenciais do transporte de energia cinética de turbulência e da taxa de dissipação de turbulência, como mostrado nas Equações 37 e 38, respectivamente.

$$\rho u \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (37)$$

$$\rho u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (38)$$

Sendo  $P_k$ , a produção de energia cinética turbulenta devido a flutuabilidade e forças viscosas, que está apresentada na Equação 39.

$$P_k = \mu_T (\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T)) \quad (39)$$

O modelo de turbulência k- $\epsilon$  assume que a viscosidade de turbulência é unida à energia cinética de turbulência (k) e a dissipação ( $\epsilon$ ), sendo assim, a viscosidade turbulenta ( $\mu_T$ ) é obtida a partir da Equação 40.

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (40)$$

Nas Equações 37 e 38 mostradas acima,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\epsilon$  são os números de Prandlt turbulento para k e  $\epsilon$  respectivamente, e  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ ,  $C_\mu$  são as constantes empíricas. Jones e Launder (1974) através de otimização numérica obtiveram os valores dessas constantes que são mostradas na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores das constantes utilizadas no modelo k- $\epsilon$ .

Constantes	Valor
$\sigma_k$	1
$\sigma_\epsilon$	1,3
$C_{\epsilon 1}$	1,44
$C_{\epsilon 2}$	1,92
$C_\mu$	0,09

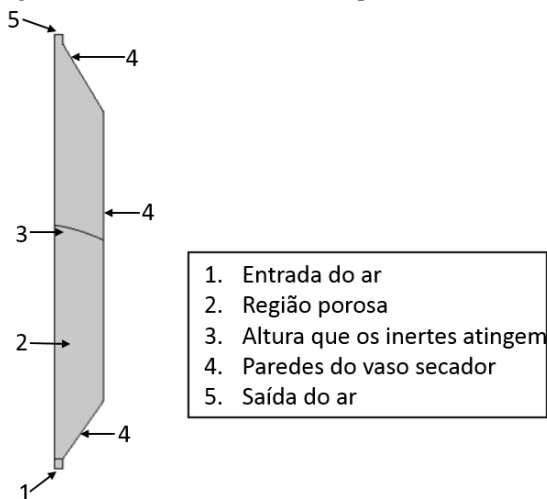
Fonte: Jones e Launder (1974).

#### b) Condições de contorno do modelo de escoamento

A Figura 13 mostra as fronteiras selecionadas para o estudo computacional do escoamento do ar na câmara de secagem em 2D axissimétrico.



Figura 13 - Fronteiras selecionadas para o modelo de escoamento do ar.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

As condições de contorno impostas são as seguintes: na fronteira denominada “Entrada do ar”, definiu-se a velocidade do ar ( $v_{ar}$ ) com valor de  $27,25 \text{ m s}^{-1}$  que foi determinada experimentalmente.

A fronteira 3 representa o limite superior atingido pelos inertes na câmara de secagem e foi determinada experimentalmente.

Quando os dados de entrada de ar para as variáveis de turbulência não estão disponíveis, aproximações para  $k$  e  $\varepsilon$  podem ser obtidas através das Equações 41 e 42, respectivamente.

$$k = \frac{3}{2}(u \cdot I_T)^2 \quad (41)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_T} \quad (42)$$

Onde:

$I_T$ : intensidade de turbulência;

$L_T$ : escala de turbulência (m);

$u$ : campo de velocidade da fase fluída ( $\text{m s}^{-1}$ );

$k$ : energia cinética turbulenta ( $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ );

$C_\mu$ : escala de turbulência (m);

Para este modelo se adotou uma intensidade de turbulência  $I_T$  de 5% e uma escala de turbulência longitudinal  $L_T$  de 1%, valores padrão propostos pelo software.

A condição de contorno nas “paredes do vaso secador” (*Wall functions*) que descrevem as condições de fluxos de fluido em estado estacionário utiliza funções de parede, de espessura  $\delta_w$ , para paredes sólidas expostas ao fluxo turbulento, são usadas para modelar a região fina com grandes gradientes em variáveis de fluxo perto da parede. As Equações 43 e 44 regem essa condição (COMSOL, 2015).

Na parede, a condição de contorno para a velocidade é descrita como sendo uma condição “sem penetração”, dada pela Equação 43.

$$u \cdot n = 0 \quad (43)$$

A relação que envolve o tensor de tensão viscosas e turbulenta (lado esquerdo) com as velocidades de atrito e tangencial (lado direito), é expressa conforme a Equação 44.

$$[(\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T)]n = \rho \frac{u_T}{\delta_w^+} u_{tang} \quad (44)$$

Onde  $u_{tang}$  é calculado pela Equação 45.

$$u_{tang} = u - (u \cdot n)n \quad (45)$$

A energia cinética turbulenta está sujeita à condição de Neumann homogênea conforme Equação 46.

$$\nabla k \cdot n = 0 \quad (46)$$

A condição de contorno para  $\varepsilon$  é escrita de acordo com a Equação 47.

$$\varepsilon = \rho \frac{C_\mu k^2}{k_V \delta_w^+ \mu} \quad (47)$$

Onde a distância  $\delta_w^+$  é calculada, segundo a relação expressa pela Equação 48.

$$\delta_w^+ = \frac{\rho u_T \delta_w}{\mu} \quad (48)$$

A condição de contorno na saída da câmara para o ar é de pressão de referência ( $p = p_{ref}$ ) para o escoamento, ou seja, pressão na saída é igual a atmosférica, onde existe uma condição para impedir que o fluido que saia não retorne para o domínio.

O valor do coeficiente convectivo de transferência de calor foi obtido do artigo da referência citada na Tabela 11 e a sua relação com o coeficiente convectivo de transferência de massa dada pela analogia Chilton-Colburn são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11 – Valores do coeficiente convectivo de transferência de massa e calor

Propriedade	Valor	Unidade	Referência
h	5,39	[W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Dieb et al., (2013)
k <sub>m</sub>	1, 36.10 <sup>-4</sup> ·h	[m s <sup>-1</sup> ]	Analogia Chilton-Colburn

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

### 3.2.5.2.2 Transferência de massa para as espécies formadas

A Equação 49 e 50 representa respectivamente a forma geral para o transporte de umidade e fluxo no ar.

$$\frac{\partial c_{i,ar}}{\partial t} + u \nabla c_{i,ar} = \nabla (D_{i,ar} \nabla c_{i,ar}) + R_{i,ar} \quad (49)$$

$$N_{i,ar} = (-D_{i,ar} \nabla c_{i,ar}) + u c_{i,ar} \quad (50)$$

Onde:

i: (Av, As, ss)

Av: espécie água na fase vapor;

As: espécie água líquida junto ao sólido seco;

ss: espécie sólido seco;

N<sub>i,ar</sub>: fluxo molar da espécie i no ar (mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>);

$\frac{\partial c_{i,ar}}{\partial t}$ : derivada da concentração em relação ao tempo (mol m<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>);

u: vetor velocidade da fase fluída (m s<sup>-1</sup>);

c<sub>i,ar</sub>: concentração da espécie i (mol m<sup>-3</sup>);

D<sub>i,ar</sub>: coeficiente de difusão da espécie i no ar (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>);

R<sub>i,ar</sub>: taxa de reação da espécie i (mol m<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>);

Na Equação 49, o primeiro termo do lado esquerdo descreve a variação da concentração com o tempo e o segundo termo do lado esquerdo representa o transporte convectivo, ou seja, a ação do campo de velocidade. O primeiro termo do lado direito descreve o transporte por difusão, que representa a interação entre as espécies diluídas e o solvente. O segundo termo do lado direito representa uma fonte externa, e é adicionado como um termo de reação. O coeficiente de difusão molecular da espécie  $i$  no ar é obtido pela Equação 51 (WELTY et al., 2008).

$$D_{i,ar,T2} = D_{i,ar,T1} \left( \frac{T2}{T1} \right)^{1,5} \frac{\Omega_{D,T1}}{\Omega_{D,T2}} \quad (51)$$

Onde:

$D_{i,ar,T1}$ : difusividade da espécie  $i$  no ar a temperatura ambiente ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );

$D_{i,ar,T2}$ : difusividade da espécie  $i$  no ar a temperatura do ar aquecido ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );

$T_2$ : temperatura do ar aquecido (K)

$T_1$ : temperatura ambiente (K);

$\Omega_{D,T1}$ : integral de colisão a temperatura do ar aquecido;

$\Omega_{D,T2}$ : integral de colisão a temperatura ambiente,

Os valores da difusividade efetiva para as espécies  $D_{Av,ar}$ ,  $D_{As,ar}$  e  $D_{ss,ar}$  para a temperatura de entrada do ar ( $T_{ar}$ ) à  $60^\circ \text{C}$  foram respectivamente  $2,6 \cdot 10^{-6}$ ,  $2,6 \cdot 10^{-10}$  e  $2,6 \cdot 10^{-10}$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

#### a) Condições de contorno

Na “Entrada do ar” (1) mostrada na figura 13 determinou-se com o uso de um termo higrômetro (*LOGBOX-RHT-LCD*), a concentração de água no ar ( $C_\infty$ ), seu valor é  $0,15 \text{ mol m}^{-3}$ , concentração essa calculada para um ar que tem uma temperatura ( $T_{ar}$ ) de  $60^\circ \text{C}$  e uma umidade relativa de 2,1 %. Nas “Paredes do vaso secador” se adotou a condição de fluxo de massa igual a zero. Na saída da câmara de secagem tem-se a condição ( $-n(D_i)\nabla c_i = 0$ ), ou seja, sem fluxo difusivo de massa na saída da câmara.

O fluxo de entrada do ar ( $N_{Av}$ ), representado pela fronteira entrada do ar na Figura 13 é dado pela Equação 52.

$$N_{Av} = c_\infty u_{ar} \quad (52)$$

Onde:

$C_{\infty}$ : concentração de água no ar ( $\text{mol m}^{-3}$ );

$u_{\text{ar}}$ : velocidade de entrada do ar na câmara de secagem ( $\text{m s}^{-1}$ ).

No modelo de secagem em leito de jorro, a pasta de microalga está aderida a superfície do inerte, e esta pasta possui uma concentração de equilíbrio na superfície pasta, esta concentração  $C_{A\text{leq},\infty}$  é a concentração de água no ar junto à superfície da pasta, obtido pela Equação (53) apresentada por Santos (2013).

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.  $C_{A\text{leq},\infty}$  é calculada pelo modelo da isoterma de Oswin modificada com a umidade relativa em função da temperatura e do teor de umidade no material.

$$c_{A\text{leq},\infty} = \frac{UR}{RT_{pm}} P_{\text{sat},\text{ar}} \quad (53)$$

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);

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

A pressão de vapor saturado do ar ( $P_{\text{sat},\text{ar}}$ ), por sua vez, foi determinada através de uma relação com a temperatura da pasta de microalga (K), apresentada na Equação 54 (TETENS, 1930 apud SANTOS, 2013).

$$P_{\text{sat},\text{ar}} = 610,8 \exp\left(\frac{17,3T_{pm} - 4725,5}{T_{pm} - 35,85}\right) \quad (54)$$

A fonte externa ( $R_i$ ) representa a quantidade das espécies (vapor, sólido seco, umidade junto ao sólido seco) que são formadas, as equações de geração são mostradas nas equações abaixo.

$$R_{Av} = \frac{K_m A_{t,i} (C_{A\text{leq},\infty} - C_{A,\infty})}{V_{rp}} \quad (55)$$

Onde:

$K_m$ : coeficiente de transferência de massa ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );

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

$c_{Al,eq,\infty}$ : concentração de água na camada de ar em contato com a superfície do sólido ( $\text{mol m}^{-3}$ );

$A_{t,i}$ : área total da superfície dos inertes ( $\text{m}^2$ );

$V_{ip}$ : volume da região porosa ( $\text{m}^3$ ).

$$R_{SS} = K_{pó}(c_{su} - c_{ss}) \quad (56)$$

Onde:

$K_{pó}$ : constante de liberação do pó ( $\text{s}^{-1}$ );

$c_{su}$ : concentração de sólido úmido ( $\text{mol m}^{-3}$ );

$c_{ss}$ : concentração de sólido seco ( $\text{mol m}^{-3}$ );

$$R_{AS} = K_{pó}(c_{su} - c_{ss}) \cdot \frac{c_{Al}}{c_{su}} \quad (57)$$

Onde:

$K_{pó}$ : constante de liberação do pó ( $\text{s}^{-1}$ );

$c_{su}$ : concentração de sólido úmido ( $\text{mol m}^{-3}$ );

$c_{ss}$ : concentração de sólido seco ( $\text{mol m}^{-3}$ );

$c_{Al}$ : concentração de água líquida ( $\text{mol m}^{-3}$ ).

### 3.2.5.2.3 Transferência de massa para as espécies injetadas

A Equação 58 representa a forma geral para o transporte de massa na “região porosa” (domínio 2), apresentada na Figura 13 sem atuação da convecção.

$$\frac{\partial c_{i,ar}}{\partial t} = \nabla(D_{i,ar}\nabla c_{i,ar}) + R_{i,ar} \quad (58)$$

Sendo que o fluxo de massa é definido pela Equação 59.

$$N_{i,ar} = (-D_{i,ar}\nabla c_{i,ar}) \quad (59)$$

Onde:

i: (Al, su)

Al: espécie água fase líquida;

su: espécie sólido úmido;

$N_{i,ar}$ : fluxo molar da espécie i no ar ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );

$\frac{\partial c_{i,ar}}{\partial t}$ : derivada da concentração em relação ao tempo ( $\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$ );

$c_{i,ar}$ : concentração da espécie  $i$  ( $\text{mol m}^{-3}$ );  
 $D_{i,ar}$ : coeficiente de difusão da espécie  $i$  no ar ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );  
 $R_{i,ar}$ : taxa de reação da espécie  $i$  ( $\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$ );

b) Condições iniciais

A concentração inicial da água na pasta de microalga ( $c_{Al,0}$ ) utilizada nas simulações foi calculada a partir dos dados obtidos experimentalmente, com um valor de 47200 ( $\text{mol m}^{-3}$ ) equivalente à 82% de umidade em base úmida.

c) Condições de contorno

Não há fluxo de entrada ou saída de umidade do domínio 2 para as espécies envolvidas, conforme demonstrado na condição de contorno 60.

$$-n \cdot (N_{Al} + N_{su}) = 0 \quad (60)$$

Os valores da difusividade efetiva para as espécies  $D_{Al,ar}$ ,  $D_{su,ar}$  obtidos utilizando a Equação 27 apresentado por Welty et al., (2008) para temperatura de entrada do ar ( $T_{ar}$ ) à 60 °C foram respectivamente  $2,6 \cdot 10^{-10}$  e  $2,6 \cdot 10^{-10}$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

Os termos de geração de líquido ( $R_{Al}$ ) e sólido úmido ( $R_{su}$ ) se dão pela injeção da pasta de microalgas na câmara de secagem O termo de geração de água injetada com a pasta de microalga é dado pela Equação (61).

$$R_{Al} = \frac{c_{Al,0} Q_{alim}}{V_{rp}} \quad (61)$$

Onde:

$c_{Al,0}$ : concentração inicial da pasta de microalga ( $\text{mol m}^{-3}$ );

$Q_{alim}$ : vazão de alimentação da pasta ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );

$V_{rp}$ : volume da região porosa ( $\text{m}^3$ ).

O termo de geração de sólido úmido é dada pela equação (62).

$$R_{su} = \frac{\rho_{ap,pm}(1 - X_{bu})Q_{alim}}{V_{rp}} \quad (62)$$

Onde:

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

$X_{bu}$ : umidade inicial da pasta de microalga;

$Q_{alim}$ : Vazão de alimentação da pasta ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );

$V_{rp}$ : volume da região porosa ( $\text{m}^3$ ).

### 3.2.5.2.4 Transferência de calor no ar

A Equação 63 descreve a conservação da energia, formulada em termos da temperatura para a transferência de calor no ar:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u C_p \nabla T = \nabla (k_f \nabla T) + Q \quad (63)$$

Onde:

$\rho$ : massa específica do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$C_p$ : calor específico a pressão constante ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

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

$K_f$ : é a condutividade térmica do fluido ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$u$ : vetor velocidade da fase fluída ( $\text{m s}^{-1}$ );

$T$ : temperatura absoluta (K);

$Q$ : fonte de calor ( $\text{W m}^{-3}$ );

### 3.2.5.2.5 Transferência de calor no meio poroso

A Equação 64 representa a transferência de calor no meio poroso.

$$(\rho C_p)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u C_p \nabla T = \nabla (k_{ef} \nabla T) + Q \quad (64)$$

Onde:

$\rho$ : massa específica do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$C_p$ : calor específico a pressão constante ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

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

$u$ : vetor velocidade da fase fluída ( $\text{m s}^{-1}$ );

$T$ : temperatura absoluta (K);

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

$Q$ : fluxo de calor ( $\text{W m}^{-3}$ ).



O primeiro termo que antecede a igualdade na Equação 64  $(\rho C_p)_{ef}$  é chamado de capacidade calorífica volumétrica efetiva, dado em  $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$  e determinado através da Equação 65.

$$(\rho C_p)_{ef} = (1 - \theta)\rho C_p + \theta\rho_p C_{p,p} \quad (65)$$

Onde:

$\theta$ : fração de volume da fase fluida;

$\rho$ : massa específica do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$C_p$ : calor específico do fluido a pressão constante ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$\rho_p$ : massa específica do meio poroso ( $\text{kg m}^{-3}$ );

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

A condutividade térmica efetiva, é dada pela Equação 66, como sendo média ponderada da condutividade térmica do fluido e do meio poroso. Este termo médio contabiliza as propriedades do meio poroso e do fluido (COMSOL, 2015).

$$k_{ef} = (1 - \theta)k_p + \theta k_f \quad (66)$$

Onde:

$\theta$ : fração de volume da fase fluida;

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

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

A parcela de calor ( $Q$ ) no lado direito da Equação 67 associada à ao calo isotérico integral, ao calor sensível de aquecimento da pasta de microalga e ao aquecimento dos sólidos presentes na pasta são incluídos como um termo fonte (COMSOL, 2015).

$$Q = Q_{total} + Q_{S1} + Q_{S2} \quad (67)$$

Onde:

$Q_{total}$ : calor total relacionado a evaporação ( $\text{J kg}^{-1}$ );

$Q_{S1}$ : calor necessário para aquecer a pasta de microalga ( $\text{J kg}^{-1}$ );

$Q_{S2}$ : calor necessário para aquecer o sólido ( $\text{J kg}^{-1}$ ).

#### a) Condição inicial

Inicialmente, a pasta de microalga está submetida à temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ).

## b) Condições de contorno

Na fronteira denominada “entrada de ar” é imposta uma temperatura de 60 °C pra todas as simulações realizadas. No meio poroso considera-se que não há convecção, uma condição aplicada para representar a pasta de microalga que permanece aderida temporariamente nas partículas inertes (COMSOL, 2015).

O aquecimento através da convecção devido ao escoamento do ar nas paredes da câmara de secagem é contabilizado pela condição de contorno apresentada na Equação 68 (COMSOL, 2015).

$$-n \cdot q = h(T_{ar} - T_{pm}) \quad (68)$$

Onde:

$n$ : normal à fronteira apontando para fora do domínio;

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

$h$ : 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).

O calor total consumido pelo processo de evaporação ( $Q_{total}$ ) é considerado tendo em vista o volume do meio poroso, conforme a Equação 69.

$$Q_{total} = M_A Q_{iso} k_c (c_{A\infty} - c_{A_{leq,\infty}}) \quad (69)$$

Onde:

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

$Q_{iso}$ : calor isostérico integral ( $\text{J kg}^{-1}$ );

$k_m$ : coeficiente de transferência de massa ( $\text{m s}^{-1}$ );

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

$c_{A_{leq,\infty}}$ : concentração de água na camada de ar em contato com a superfície do pó ( $\text{mol m}^{-3}$ ).

$Q_{iso}$  representa o calor isostérico integral, um parâmetro que estima a quantidade mínima de calor requerida para remover uma quantidade de água adsorvida na fase sólida. Para calcular o valor desta propriedade, procedeu-se conforme Santos (2013), através das Equações 70 e 71.

$$Q_{iso} = q_{iso} + \Delta H_{VAP} \quad (70)$$

Sendo,

$$q_{iso} = A \exp(-BX_{eq}) \quad (71)$$

Onde:

Xeq: teor de umidade de equilíbrio (Kg água Kg<sup>-1</sup> sól. seco).

O cálculo para determinação do calor de vaporização da água pura ocorre conforme a Equação 72.

$$Q_{st} = \Delta H_{VAP} = -4,35T_{pm}^2 + 452,05T_{pm} + 2,69 \cdot 10^6 \quad (72)$$

Onde:

T<sub>pm</sub>: temperatura da pasta de microalga (K).

Na Equação 73 apresenta-se o termo Q<sub>S1</sub> que expressa o calor necessário para aquecer a pasta de microalga.

$$Q_{S1} = RC_{Al}M_A C_{pliq}(T_{pm} - T_{ar}) \quad (73)$$

Onde:

RC<sub>Al</sub>: termo de geração de líquido no meio poroso (mol m<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>);

M<sub>A</sub>: massa molar da água (kg mol<sup>-1</sup>);

T<sub>pm</sub>: temperatura da pasta de microalga (K).

T<sub>ar</sub>: temperatura do ar (K).

C<sub>pliq</sub>: capacidade calorífica da água a pressão constante (J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>);

A capacidade calorífica da água a pressão constante (C<sub>pliq</sub>) é dada pela Equação 74.

$$C_{pliq} = 12010,15 - 80,41T + 0,31T^2 + 5,38T^3 + 3,63 \cdot 10^{-7}T^4 \quad (74)$$

Onde:

T<sub>ar</sub>: temperatura do ar (K).

O termo Q<sub>S2</sub> que expressa o calor necessário para aquecer o sólido presente na pasta.

$$Q_{S2} = RC_{su}M_{su}C_{psól}(T_{pm} - T_{ar}) \quad (75)$$

Onde:

RC<sub>su</sub>: termo de geração de sólido úmido no meio poroso (mol m<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>);

M<sub>su</sub>: massa molar do sólido (kg mol<sup>-1</sup>);

$C_{psól}$ : capacidade calorífica do sólido ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ );

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

A relação de equilíbrio entre a atividade de água do ar ( $a_w$ ) e do meio poroso ( $X_{eq}$ ) foi obtida ajustando os modelos de isoterma aos dados experimentais de Oliveira et al. (2009), esses dados referem-se a secagem da *Spirulina platensis* em temperaturas de 40, 50 e 60°C e atividade de água entre 4,9 e 89 %, apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Teor de umidade de equilíbrio do meio poroso em função da atividade de água para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C.

<b>Temperatura (°C)</b>					
<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
<b>Umidade de equilíbrio (<math>X_{eq}</math>)</b>			<b>Atividade de água (<math>a_w</math>)</b>		
0,082	0,077	0,051	0,049	0,055	0,061
0,126	0,103	0,067	0,102	0,110	0,124
0,132	0,132	0,075	0,178	0,189	0,199
0,160	0,129	0,077	0,267	0,280	0,287
0,185	0,169	0,100	0,366	0,380	0,388
0,229	0,204	0,125	0,470	0,483	0,488
0,261	0,216	0,147	0,574	0,582	0,584
0,310	0,313	0,223	0,674	0,681	0,682
0,465	0,428	0,254	0,753	0,770	0,776
0,578	0,561	0,352	0,824	0,829	0,830
0,772	0,685	0,425	0,878	0,888	0,890

Fonte: Oliveira (2009).

Dentre equações mais comuns para expressar a umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar estão as de Henderson-Thopson, Oswin modificada, Chung-Pfost, Sabbah e GAB modificado. Estes modelos foram escolhidos porque já foram utilizados em trabalhos experimentais para determinação de isotermas de pastas e são apresentados no Quadro 1 (SIMIONI, 2015, RESENDE et al., 2015, TIENDREBEOGO et al., 2015, OLIVEIRA et al., 2009).

Entre os modelos matemáticos apresentados, o modelo que melhor representou os dados foi incorporado às equações fenomenológicas de transferência de umidade da pasta de microalga para o ar de secagem.

Quadro 1 - Modelos matemáticos utilizados para determinar a relação de equilíbrio higroscópico entre a pasta e o ar.

<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>
<b>Henderson-Thompson</b>	$X_e = \left( \frac{\ln[1 - UR]}{-(aT + b)} \right)^c$
<b>Oswin modificada</b>	$X_e = (aT + b) \left( \frac{UR}{1 - UR} \right)^c$
<b>Chung-Pfsot</b>	$X_e = a - b \ln[-(-T + c) \ln(UR)]$
<b>Sabbah</b>	$X_e = a \left( \frac{UR^b}{T^c} \right)$
<b>GAB Modificado</b>	$X_e = \left( \frac{ab \left( \frac{c}{T} \right) UR}{(1 - bUR)(1 - bUR + b \left( \frac{c}{T} \right) UR)} \right)$

Fonte: Adaptado de Santos (2013).

### 3.2.6 Parâmetros utilizados na simulação

Após realizada a modelagem da secagem em leito de jorro, as simulações foram realizadas com o intuito de reproduzir o comportamento observado na etapa experimental, para isto, os mesmos parâmetros foram utilizados, na Tabela 13, os principais parâmetros avaliados nas simulações são apresentados.

Tabela 13 - Parâmetros empregados nas simulações.

Simulação	Parâmetros			Tempo simulado (s)
	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m s <sup>-1</sup> )	Vazão de alimentação (ml min <sup>-1</sup> )	
1	60	27,25	0,25	73
2	60	27,25	0,45	60
3	60	27,25	0,60	55
4	60	27,25	0,80	66

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados da secagem da pasta de microalga da espécie *Scenedesmus acuminatus* pela técnica de leito de jorro. No primeiro momento, serão apresentados os resultados relacionadas as curvas de secagem, caracterização das partículas inertes, caracterização fluidodinâmica do leito de jorro e avaliação do desempenho da secagem. Em seguida, serão apresentados os resultados relacionados a abordagem computacional, que inclui o ajuste do modelo de isoterma de adsorção aos dados experimentais e obtenção do calor isostérico, além dos perfis de velocidade, pressão, temperatura e concentração obtidos com as simulações. Por fim, serão feitas comparações dos resultados experimentais e simulações referentes a massa acumulada na câmara de secagem para as distintas vazões de alimentação.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA DE MICROALGA E DAS PARTÍCULAS INERTES

#### 4.1.1 Caracterização da biomassa de microalga

A pasta de microalga foi caracterizada quanto à umidade em base úmida ( $X_{bu}$ ), massa específica aparente ( $\rho_{ap,pm}$ ) e massa específica bulk ( $\rho_{b,pm}$ ) onde os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Caracterização da microalga *Scenedesmus acuminatus*

Caracterização	Valor
Umidade	73 %
$\rho_{ap,pm}$	1036,1 kg m <sup>-3</sup>
$\rho_{b,pm}$	688,55 kg m <sup>-3</sup>

Fonte: Desenvolvido pelo autor

A pasta de microalga foi diluída até a umidade ( $X_{bu}$ ) de 82 %, a fim de facilitar sua injeção na câmara de secagem.

#### 4.1.2 Caracterização das partículas inertes

Os resultados da caracterização das partículas inertes de EVA são apresentados na Tabela 15 e foram descritos de acordo com a metodologia apresentada no item 3.2.2 do capítulo anterior.

Tabela 15 - Propriedades das partículas de EVA.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro médio de partícula	3,095 mm
Massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ )	929,49 kg m <sup>-3</sup>
Massa específica volumétrica ( $\rho_b$ )	540,45 kg m <sup>-3</sup>
EVA ( $\epsilon_{EVA}$ )	0,35
Área superficial dos inertes ( $A_{surp,i}$ )	0,1949 m <sup>2</sup>
Número de partículas inertes ( $n_{part,i}$ )	6485

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Mathur e Epstein (1974) testaram em seu trabalho diversos tamanhos de partículas e recomendam que o diâmetro médio das partículas inertes utilizadas deve ser maior que 1 mm para que o regime de jorro seja praticado, diversos trabalhos na literatura fazem uso dessa recomendação (SOUSA; FREIRE; FREIRE, 2011; ALVAREZ et al., 2015; ARTETXE et al., 2015). Além disso, eles afirmam ainda que ter uma uniformidade em relação ao tamanho das partículas inertes ajuda a manter a estabilidade no leito de jorro.

Para se utilizar partículas de diâmetro menor que 1 mm e para que se tenha uma boa estabilidade do jorro, recomenda-se que o diâmetro de entrada de ar na câmara de secagem não exceda 30 vezes o diâmetro da partícula (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

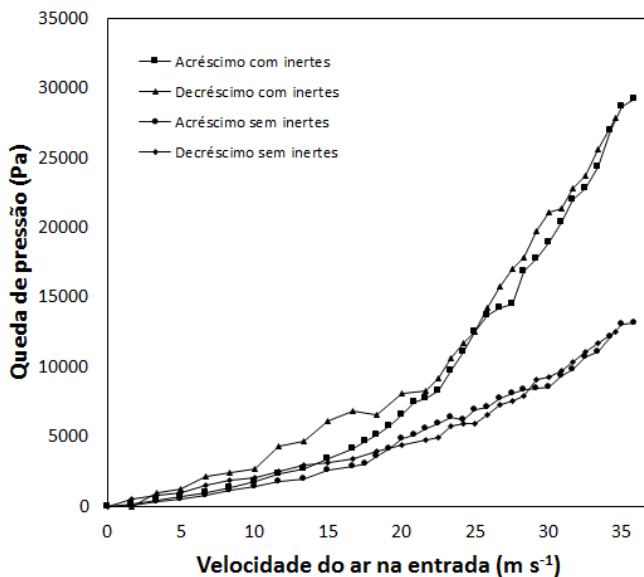
## 4.2 ESTUDO EXPERIMENTAL

### 4.2.1 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro

Como descrito no item 3.2.1.4 da metodologia, foi contabilizada a queda de pressão proporcionada pelo leito vazio, sem a presença das partículas inertes. As curvas para o acréscimo e decréscimo do ar são apresentadas na Figura 14.



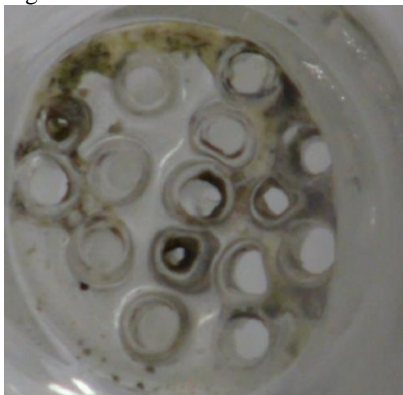
Figura 14 - Queda de pressão no leito sem e com as partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Pode-se observar pela Figura 14 que o leito vazio gera uma queda de pressão elevada, isto é ocasionado pelo do bocal de entrada de ar que possui furos não uniformes, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Vista inferior do bocal de entrada do ar de secagem

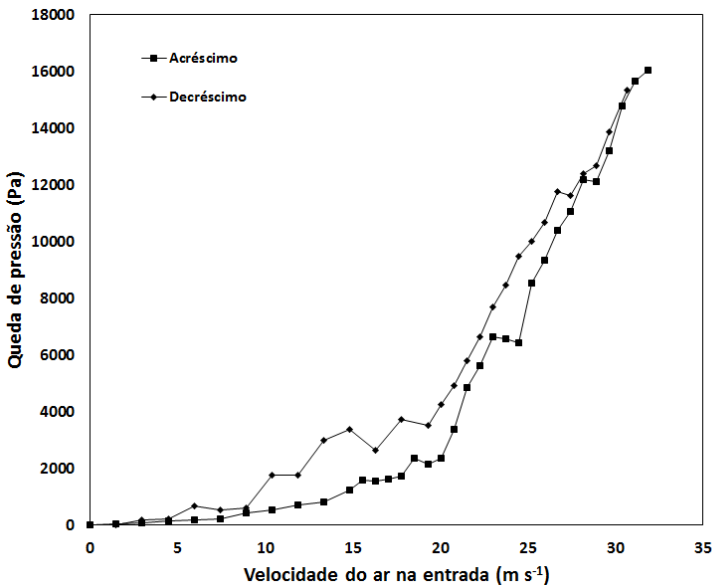


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Acredita-se que o que gera a grande perda de carga durante a operação de secagem é a placa de vidro perfurada apresentada na Figura 15, construída com o intuito de deixar o ar de secagem escoar e reter as partículas de EVA utilizadas no leito.

A curva fluidodinâmica do leito de jorro na temperatura do ar de entrada de 60°C foi determinada descontando o valor da queda de pressão ocasionada pelo leito vazio, com o objetivo de quantificar somente a perda de carga causada pelos inertes, como apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada para a temperatura de 60°C.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

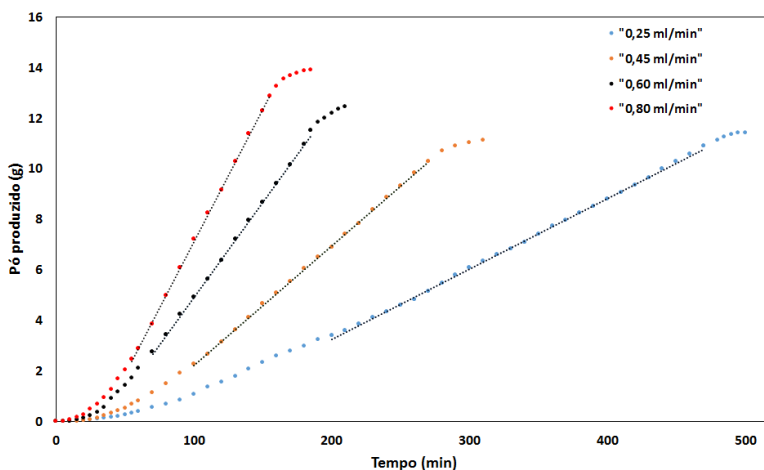
O comportamento esperado para as curvas apresentadas na Figura 16 era que pouco antes do aparecimento do jorro fosse observado o pico na queda de pressão, comportamento obtido por vários autores consultados na literatura (DU et al., 2015; LIU et al., 2015). Porém este comportamento não foi observado, Nelson e Gay (1969) apud Mathur e Epstein (1974) obtiveram um comportamento semelhante ao da Figura 16 e os autores acreditam que a causa seja a entrada de ar do sistema de secagem em leito de jorro.

Durante o decréscimo da velocidade do ar foi determinada por observação experimental a velocidade mínima de jorro ( $v_{mj}$ ), seu valor é de  $27,25 \text{ m s}^{-1}$ .

#### 4.2.2 Análise do processo de secagem em leito de jorro

Na Figura 17 é apresentado um gráfico comparativo do acompanhamento de pó ao longo do tempo de secagem correspondente a cada vazão de alimentação realizada.

Figura 17 - Quantidade de pó produzido ao longo do tempo, para todas as vazões testadas.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A partir do gráfico acima, nota-se que as vazões de  $0,25$  e  $0,45 \text{ mL min}^{-1}$  resultaram ao final da secagem em uma produção da quantidade de pó produzida muito próxima, algo em torno de  $11,4 \text{ g}$ , porém o tempo total da secagem com essas vazões foram suficiente bem maiores, indicando que para a secagem contínua realizada essas vazões não se mostraram viáveis, pois exigiram um tempo maior e produziram uma quantidade menor de sólido seco. Nas vazões de  $0,6$  e  $0,8 \text{ mL min}^{-1}$  obteve-se  $12,53$  e  $13,91\text{g}$  respectivamente.

Ainda é possível observar na Figura 17 as linhas tracejadas, que são ajustes lineares que mostram o regime estacionário para cada vazão de alimentação testada, momento em que a taxa de produção de pó não

varia com o tempo, percebe-se de forma geral que quanto maior a vazão de alimentação testada mais rapidamente o regime permanente é atingido.

Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos ajustes lineares e o momento em que para cada curva se inicia o regime permanente apresentados na Figura 17, estão dispostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o momento em que se inicia o regime permanente.

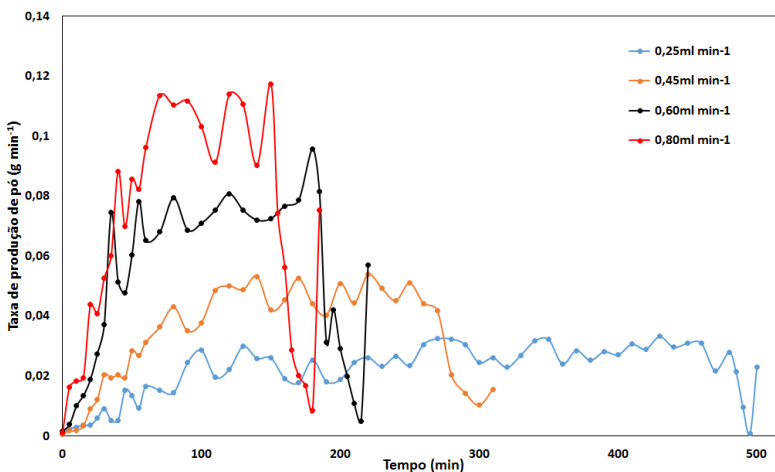
Vazão	$R^2$	Tempo inicial regime estacionário (min)
0,25 mL min <sup>-1</sup>	0,9991	200
0,45 mL min <sup>-1</sup>	0,9998	100
0,60 mL min <sup>-1</sup>	0,9994	70
0,80 mL min <sup>-1</sup>	0,9996	55

Fonte: Desenvolvido pelo autor

Portanto, pelos bons valores do ajuste linear apresentados na Tabela 16, pode-se afirmar que o regime permanente é alcançado, momento em que a taxa de produção permanece constante até que a alimentação seja cessada na câmara de secagem.

A taxa de produção de pó é apresentada na Figura 18, evidenciando o período em que a produção de pó foi mais intensa.

Figura 18 - Taxa de produção de pó em função do tempo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A partir da análise da Figura 18 percebe-se que quanto menor é a vazão de alimentação menor é a taxa de produção, sendo assim, o processo com a vazão de alimentação ( $0,25 \text{ mL min}^{-1}$ ) teve a produção de pó mais lenta dentre os casos estudados, com a taxa de produção máxima de  $0,03315 \text{ g min}^{-1}$  aos 430 minutos de processo. O que justifica a alta produção de pó na Figura 17 para a vazão de alimentação ( $0,80 \text{ mL min}^{-1}$ ) é a alta taxa em que a mesma ocorre, com a taxa de produção máxima de  $0,1139 \text{ g min}^{-1}$  aos 120 minutos.

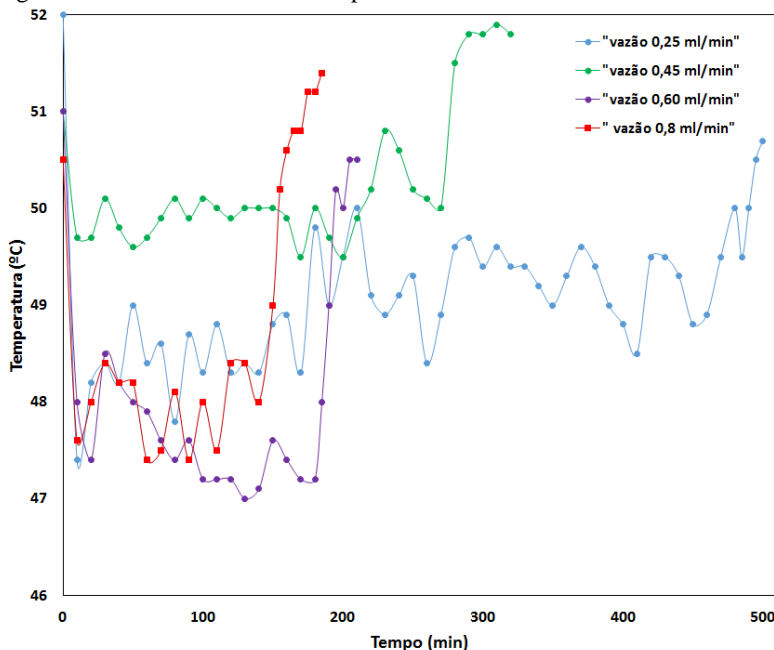
As alimentações de  $0,45$  e  $0,60 \text{ mL min}^{-1}$  apresentam taxa de produção de pó máxima de  $0,0539$  e  $0,0957 \text{ g min}^{-1}$  no tempo 220 e 180 minutos respectivamente.

Observa-se em todas as curvas apresentadas na Figura 18 que no final há uma redução abrupta na taxa de produção de pó que é resultado do fim da alimentação na câmara de secagem, havendo assim uma diminuição brusca na taxa de produção de pó.

#### **4.2.3 Temperatura e umidade do ar na saída do ciclone**

Na saída do ciclone com a utilização do termohigrômetro a temperatura do ar e umidade relativa foram medidas como descrito no item 3.2.1.2 da metodologia. O comportamento da temperatura e da umidade relativa em função do tempo de secagem são apresentados nas Figuras 19 e 20, respectivamente.

Figura 19 – Monitoramento da temperatura do ar de saída.

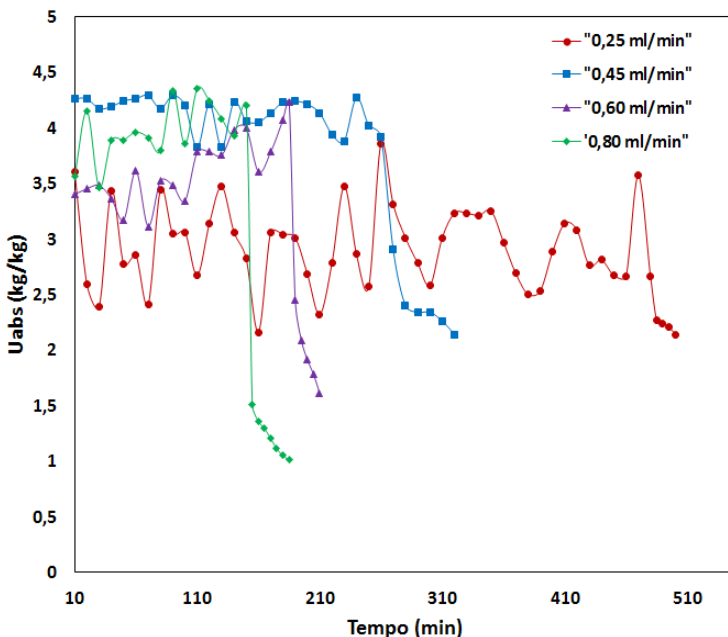


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

De forma geral, observa-se em todas as curvas o mesmo comportamento apresentado por Machado (2015), um comportamento pouco oscilatório da temperatura em função do tempo de resposta para medição da temperatura com o termohigrômetro e da interação do ar com a pasta que é alimentada. Percebe-se também nas curvas apresentadas na figura acima, que ao final de cada curva há um respectivo aumento na temperatura de saída do ciclone até chegar a um valor constante, isso se deve ao fato da alimentação ter chegado ao fim.

Vale ainda ressaltar, que devido a perdas de energia para o ambiente e para o aquecimento da pasta de microalgas, a temperatura na saída do ciclone esteve numa faixa de 48 a 50 °C durante todos os ensaios realizados, a temperatura de entrada do ar na câmara de secagem foi de 60 °C.

Figura 20 – Umidade absoluta do ar na saída do ciclone em função do tempo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Conforme se observa, o comportamento da umidade do ar é semelhante ao observado para a temperatura, com oscilações em função do tempo. Ao final da secagem correspondente a cada vazão de alimentação nota-se que o ar deixa o ciclone com um menor teor de umidade pois a temperatura está mais elevada.

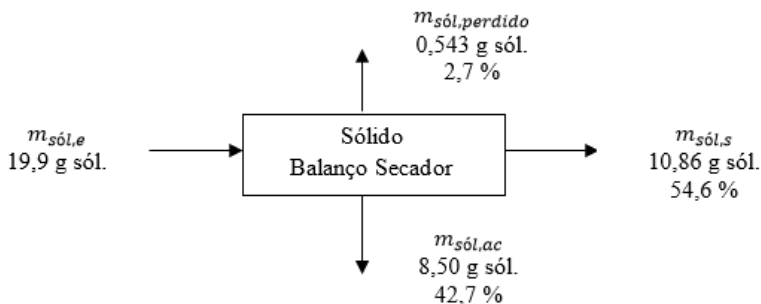
É importante ressaltar que a maneira como foram efetuadas as medidas de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar na saída do ciclone, em intervalos de 5 minutos até a primeira hora da secagem, e depois a cada 10 minutos até o fim da secagem, poderiam estar defasados no tempo, pois o termo higrômetro possui um tempo de resposta.

#### 4.2.4 Balanço de massa total para o sólido e água na câmara de secagem

Os balanços de massa total da espécie sólida (microalga) e água injetados foram realizados para cada vazão de alimentação testada (0,25, 0,45, 0,60 e 0,80 mL min<sup>-1</sup>).

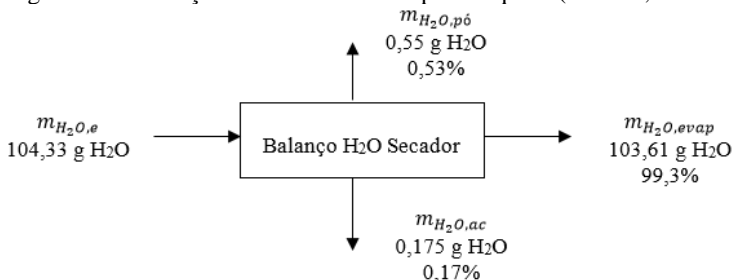
Os balanços de massa das correntes de entrada e saída para o sólido e água com a vazão  $0,25 \text{ mL min}^{-1}$  são apresentados nas Figuras 21 e 22 respectivamente.

Figura 21 – Balanço total de massa para o sólido (vazão  $0,25 \text{ ml min}^{-1}$ ).



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 22 – Balanço total de massa da espécie líquida (vazão  $0,25 \text{ ml min}^{-1}$ ).

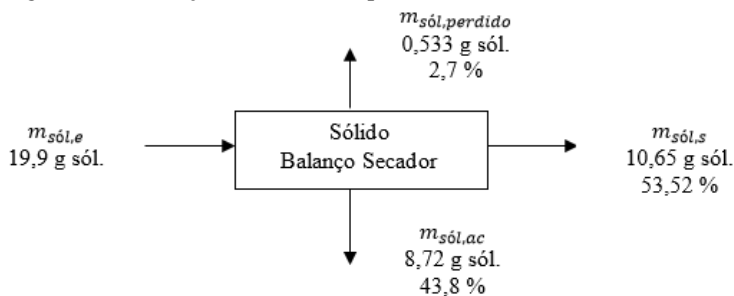


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Com a vazão  $0,45 \text{ mL min}^{-1}$ , o balanço de massa para o sólido (Figura 23) e da espécie líquida (Figura 24).

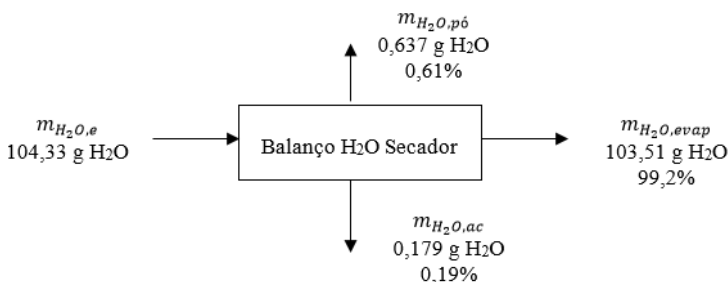


Figura 23 – Balanço total de massa para o sólido (vazão 0,45 ml min<sup>-1</sup>).



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

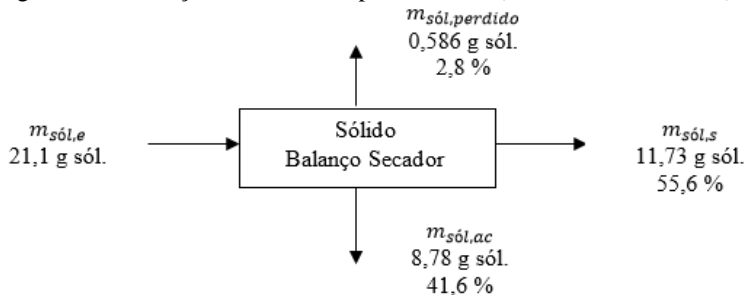
Figura 24 – Balanço total de massa da espécie líquida (vazão 0,45 mL min<sup>-1</sup>).



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

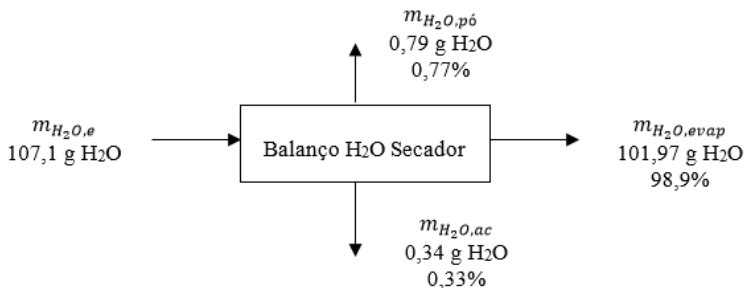
Os balanços de massa das correntes de entrada e saída para o sólido e água com a vazão 0,60 mL min<sup>-1</sup> são apresentados nas Figuras 25 e 26 respectivamente.

Figura 25 – Balanço total de massa para o sólido (vazão 0,60 mL min<sup>-1</sup>).



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

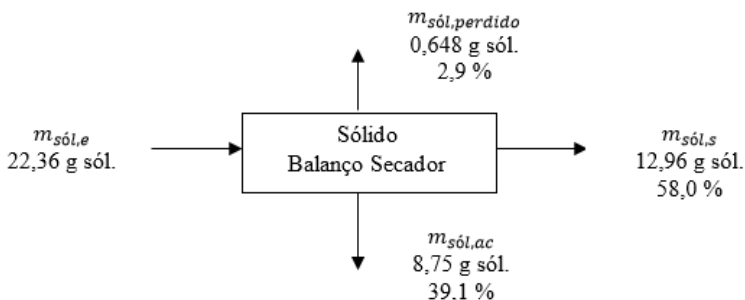
Figura 26 – Balanço total de massa da espécie líquida (vazão 0,60 mL min<sup>-1</sup>).



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

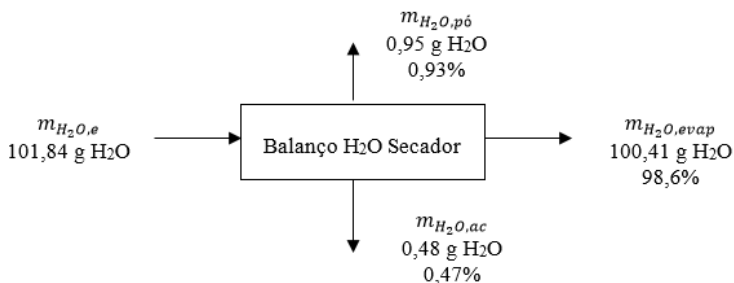
Com a vazão de alimentação (0,80 mL min<sup>-1</sup>), o balanço do sólido (Figura 27) e o balanço para a espécie líquida (Figura 28).

Figura 27 – Balanço total de massa para o sólido (vazão 0,80 mL min<sup>-1</sup>).



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 28 – Balanço total de massa da espécie líquida (vazão 0,80 mL min<sup>-1</sup>).



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Como verificado nas Figuras 21 a 28, o balanço de massa das duas espécies se manteve preservado, é importante destacar que em todos os casos a quantidade de vapor produzido foi superior a 98,5%, mostrando assim que na secagem em leito de jorro a quantidade de água junto ao pó produzido e a massa acumulada representa uma pequena parcela.

Para uma melhor visualização e entendimento das porcentagens das espécies dos balanços realizados acima, a Tabela 17 é apresentada com as porcentagens da quantidade de sólido acumulado (% sól,ac), sólido na saída da câmara (% sól,s), sólido perdido no ciclone (% sól,p), água acumulada (% H<sub>2</sub>O,ac), água que sai com o pó (% H<sub>2</sub>O,pó) e água evaporada (% H<sub>2</sub>O,evap).

Tabela 17 – Porcentagens das espécies sólidas e líquidas.

<b>Alimentação (mL min<sup>-1</sup>)</b>	<b>sól,ac %</b>	<b>sól,s %</b>	<b>sól,p %</b>	<b>H<sub>2</sub>O,pó %</b>	<b>H<sub>2</sub>O,evap %</b>	<b>H<sub>2</sub>O,ac %</b>
0,25	42,7	54,6	2,7	0,53	99,3	0,17
0,45	43,8	53,52	2,7	0,61	99,2	0,19
0,60	41,6	55,6	2,8	0,77	98,9	0,33
0,80	39,1	58,0	2,9	0,93	98,6	0,47

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

#### 4.2.5 Avaliação do desempenho do processo de secagem

É apresentado na Tabela 18 os resultados relacionados a secagem experimental em leito de jorro, como a massa de pó produzido ao final da secagem (g), a umidade do pó produzido em base seca, o tempo total do processo (min) e uma estimativa da produtividade (g h<sup>-1</sup>).

Tabela 18 - Principais resultados obtidos nos experimentos de secagem em leito de jorro.

<b>Alimentação (mL min<sup>-1</sup>)</b>	<b>Massa de pó produzido (g)</b>	<b>X<sub>bs,pó</sub> (%)</b>	<b>Tempo de secagem (min)</b>	<b>Produtividade (g h<sup>-1</sup>)</b>
0,25	11,41	5,37	500,00	1,37
0,45	11,26	6,00	320,00	2,11
0,60	12,53	6,72	220,00	3,42
0,80	13,91	7,30	185,00	4,51

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Os resultados da Tabela 18 mostram que com o aumento da alimentação contínua empregada há um aumento da produtividade, Simioni (2015) obteve o mesmo comportamento para as vazões de alimentação não contínuas testadas na secagem em leito de jorro da microalga *Scenedesmus acuminatus*. A produtividade da alimentação  $0,8\text{mL min}^{-1}$  ( $4,51\text{g h}^{-1}$ ) mais que triplicou em comparação com a alimentação  $0,25\text{mL min}^{-1}$  ( $1,37\text{g h}^{-1}$ ).

Com a análise da Tabela 18 e do gráfico da Figura 19 destaca-se o experimento com alimentação de  $0,8\text{ mL min}^{-1}$  por seus bons resultados, pois resultou em uma produtividade mais elevada em comparação com todos os experimentos realizados.

Nota-se ainda a partir da Tabela 18 que a umidade do pó produzido em base seca apresentou um comportamento crescente com o aumento da vazão de alimentação testadas nos experimentos, esta umidade encontra-se abaixo do limite de especificação de umidade comercial que é de 10%, em base seca. Machado (2015) encontrou valores de umidade em base seca na faixa de 4,18 a 9,99% na secagem intermitente em leito de jorro da graviola e leite.

Para avaliar o desempenho do processo de secagem no leito de jorro empregado a Tabela 19 foi construída, onde estão apresentadas a umidade em base úmida do pó e a acumulada na câmara de secagem, a taxa de recuperação de produto ( $R_P$ ), eficiência na produção de pó ( $\eta_{pó}$ ) e a massa acumulada na câmara de secagem ( $m_{ac}$ ).

Tabela 19 - Indicadores do desempenho dos experimentos de secagem em leito de jorro.

<b>Alimentação (<math>\text{mL min}^{-1}</math>)</b>	<b><math>X_{bu,pó}</math> %</b>	<b><math>X_{bu,ac}</math> %</b>	<b><math>R_P</math> (%)</b>	<b><math>\eta_{pó}</math> (%)</b>	<b><math>m_{ac}</math> (g)</b>
0,25	5,10	1,9	8,82	54,75	8,50
0,45	5,66	1,9	8,56	53,70	8,72
0,60	6,30	3,5	9,50	55,88	8,78
0,80	6,80	4,9	10,49	58,27	8,75

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Dentre todos os experimentos realizados destaca-se o que ocorre a vazão de alimentação  $0,8\text{mL min}^{-1}$  pois apresentou uma taxa de recuperação de produto ( $R_P$ ) e eficiência na produção de pó ( $\eta_{pó}$ ) maiores em comparação com as outras vazões testadas, além de apresentar também a maior produtividade como visto anteriormente na Tabela 18.

Verifica-se também que com o aumento da vazão empregada há um aumento da massa acumulada ( $m_{ac}$ ) na câmara de secagem, e como são injetadas quantidades de pasta de microalga iguais em todas as vazões testadas, espera-se então que quanto maior a vazão maior a quantidade de massa acumulada, pois o tempo total de operação da secagem é menor com o aumento da vazão.

Como todos os indicadores de desempenho da vazão de alimentação  $0,8\text{mL min}^{-1}$  apresentam-se superiores e o tempo de secagem é menor, pode-se concluir que esta vazão de alimentação representa a melhor alternativa dentre as vazões testadas.

A secagem da microalga *Scenedesmus acuminatus* com alimentação contínua apresentou rendimentos na faixa de 53,70 a 58,27%, maiores em comparação com a secagem em leito de jorro com alimentação intermitente da mistura de frutas, com rendimentos na faixa de 35,6 a 52,3% (SOUZA, 2009).

Na mesma câmara de secagem utilizada nos ensaios, Simioni (2015) realizou a secagem da espécie *Scenedesmus acuminatus* para diversas vazões empregadas com quantidades iguais de pasta injetada (20,6g) para cada vazão, resultando em rendimentos na faixa de 67,53 à 87,59 e taxas de recuperação de produto na faixa de 14,40 à 18,68. O que justifica os menores valores da eficiência ( $\eta_{pó}$ ) e da taxa de recuperação de produto ( $R_p$ ) apresentadas na Tabela 20 é a quantidade de massa acumulada na câmara de secagem, ou seja, as quantidades de pasta injetadas foram quantidades limites para a capacidade máxima de secagem no leito de jorro.

A Tabela 19 mostra ainda que quanto maior a vazão de alimentação maior será a umidade do pó em base úmida obtida ao final da secagem para as vazões testadas, isto se deve ao fato de que vazões maiores implicam em um menor tempo de secagem, resultando em uma menor retirada da umidade.

## **4.2.6 Isoterma de equilíbrio e calor isostérico**

### **4.2.6.1 Determinação do equilíbrio higroscópico entre o ar de secagem e a pasta de microalga**

Os modelos de isotermas de Henderson – Thompson, Oswin modificada, modelo Chung-Pfost, Sabbah e GAB modificado foram utilizados para ajustar os dados experimentais da Tabela 10 pelo método

dos mínimos quadrados. Na Tabela 20 são apresentadas as constantes dos modelos e os coeficientes de determinação.

Tabela 20 – Constantes dos modelos de isoterma ajustados com os respectivos coeficientes de determinação.

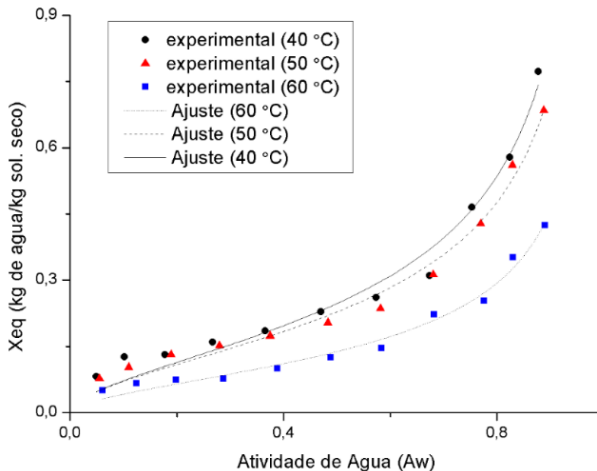
Modelo	Constantes			R <sup>2</sup>
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
<b>Oswin modificada</b>	-0,0059	2,1021	0,5506	0,9895
<b>Henderson – Thompson</b>	0,0982	-1,0021	0,9436	0,9231
<b>Chung - Pfof</b>	0,7307	0,1676	-22,3593	0,8477
<b>Sabbah</b>	75,7995	1,7600	1,2119	0,8618
<b>GAB modificado</b>	379,8260	0,4799	0,3884	0,9361

Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo que melhor representou os dados foi o de Oswin modificada, baseado no maior valor do coeficiente de determinação de 0,9895, este modelo foi incorporado as equações fenomenológicas de transferência de calor e massa da pasta para o ar de secagem.

A Figura 29 mostra as isotermas de Oswin modificada ajustadas para as temperaturas consideradas e seus pontos experimentais. Vale ressaltar, que este modelo foi suficiente para representar razoavelmente o equilíbrio entre a pasta e ar de secagem.

Figura 29 – Modelo de Oswin modificada ajustado aos pontos experimentais nas temperaturas de 40, 50 e 60°C



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O comportamento da isoterma de dessecção de umidade da microalga foi o esperado, como observado na Figura 29 e semelhante a maioria dos produtos higroscópicos, nota-se que os teores da umidade de equilíbrio decrescem com o aumento da temperatura e com a diminuição da atividade de água (SALMWEND et al., 2015, OLIVEIRA et al., 2009).

#### 4.2.7 Calor isostérico

O calor isostérico representa a quantidade de energia necessária para retirar a umidade de um determinado material. É possível fazer uma estimativa da demanda energética em posse do calor isostérico. Com o intuito de obter um modelo que represente o calor isostérico em função do teor de umidade, valores da atividade de água ( $a_w$ ) foram calculados com a isoterma de Oswin modificada, e ajustados aos pontos (OLIVEIRA et al., 2009), a equação do modelo é apresentada na Equação (76), para uma faixa de temperatura de 30 a 80°C e teor de umidade de material entre 0,04 e 0,22, onde a atividade de água é calculada e mostrada na Tabela 21.

$$X_e = (-0,00589T + 2,10208) \left( \frac{UR}{1 - UR} \right)^{0,55058} \quad (76)$$

Tabela 21 - Valores de atividade de água entre temperaturas de 30 a 70°C e umidade de equilíbrio entre 0,04 e 0,22.

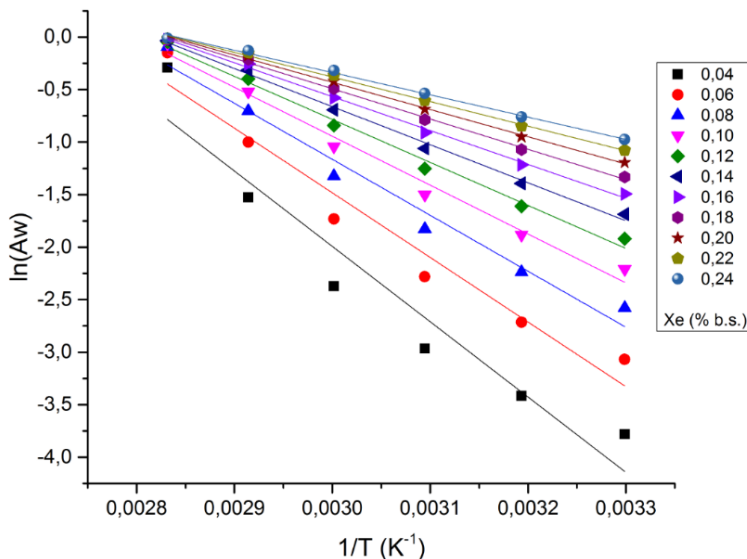
T (K)	Xe (% b.s.)									
	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
<b>303</b>	0,02	0,04	0,07	0,10	0,14	0,18	0,22	0,26	0,30	0,34
	28	65	60	98	66	52	46	40	28	06
<b>313</b>	0,03	0,06	0,10	0,15	0,19	0,24	0,29	0,34	0,38	0,42
	28	62	68	20	98	83	63	27	70	88
<b>323</b>	0,05	0,10	0,16	0,22	0,28	0,34	0,40	0,45	0,50	0,54
	16	20	08	32	57	61	28	52	29	60
<b>333</b>	0,09	0,17	0,26	0,35	0,43	0,50	0,56	0,61	0,65	0,69
	34	70	62	23	10	06	09	27	70	49
<b>343</b>	0,21	0,36	0,49	0,59	0,67	0,73	0,77	0,81	0,83	0,86
	76	74	48	49	16	02	52	03	80	01
<b>353</b>	0,74	0,86	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98
	72	06	23	98	60	64	34	84	21	49

Fonte: Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Para o cálculo do calor isostérico, o gráfico do logaritmo neperiano da atividade de água foi plotado em função do inverso das temperaturas para cada teor de umidade do material, como mostrado na Figura 30, como o coeficiente angular de cada reta é expresso como a razão do calor isostérico líquido pela constante dos gases ( $R=0,4618 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), então multiplicando essa constante obtém-se o calor isostérico líquido.



Figura 30 – Gráfico do logaritmo neperiano da atividade de água em função do inverso das temperaturas.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O calor isostérico integral foi obtido somando-se o calor isostérico líquido ao calor de vaporização da água como apresentado na Tabela 22, na temperatura de 50 °C (que é igual a 2382,18 kJ kg<sup>-1</sup>), valor médio entre as temperaturas nas quais foram obtidos os dados da isoterma de dessecção. O comportamento da Tabela 22 mostra que quanto menor é o valor da umidade na pasta maior é a energia requerida para retirar a quantidade de água do mesmo, comportamento semelhante ao verificado em diversos trabalhos de secagem com microalgas e alimentos (OLIVEIRA et al, 2009; FIORENTIN et al., 2010; RESENDE et al., 2015).

Tabela 22 – Valores calculados do calor isostérico de sorção e integral.

<b>Xe (% b.s.)</b>	<b>q<sub>st</sub> (kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)</b>	<b>Q<sub>st</sub> (kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)</b>
0,04	2459,4	4841,58
0,06	2279,3	4661,48
0,08	2087,9	4470,1
0,10	1900,5	4282,7
0,12	1724,9	4107,1
0,14	1564,5	3946,7
0,16	1419,8	3801,9
0,18	1290,3	3672,5
0,20	1175,0	3557,2
0,22	1072,4	3454,6

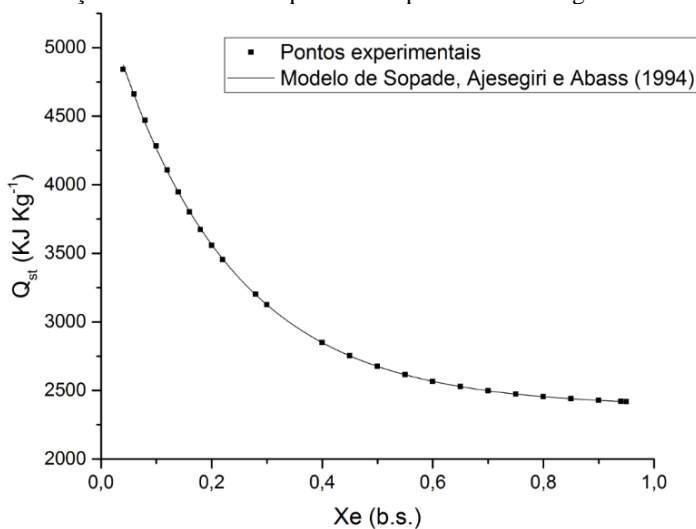
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A soma do calor isostérico líquido com a entalpia de vaporização resulta no calor isostérico integral, para representar a variação do calor isostérico líquido com o teor de umidade da pasta, o modelo de Sopade, Ajisegiri e Abass (1994) foi utilizado, onde o modelo do calor isostérico integral é mostrado na Equação 77.

$$Q_{st} = 2998,79 \exp(-4,648Xe) + 2382,18 \quad (77)$$

O modelo de Sopade, Ajisegiri e Abass foi ajustado aos pontos experimentais, como apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Modelo ajustado aos valores do calor isostérico integral de dessorção em função da umidade de equilíbrio da pasta de microalga.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O modelo de Sopade, Ajisehiri e Abass (1994) representou de forma adequada os valores da Tabela 23, com coeficiente de determinação igual a 0,998.

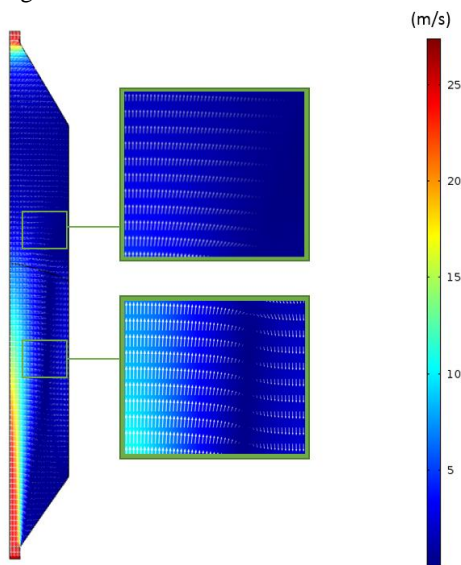
A seguir, será apresentado os resultados das simulações realizadas no COMSOL *Multiphysics* para as vazões de alimentações de 0,25, 0,45, 0,60 e 0,8 mL min<sup>-1</sup> que foram realizadas experimentalmente. Os principais resultados obtidos mostram o perfil de velocidade, o perfil de pressão, o perfil de temperatura e o perfil de umidade das espécies envolvidas para cada vazão de alimentação citada, com o intuito de validar a simulação realizada, a comparação do perfil de umidade do vapor e do pó produzido na saída do secador foram comparados com os perfis obtidos experimentalmente.

### 4.3 ESTUDO COMPUTACIONAL

#### 4.3.1 Perfil de velocidade

O perfil de velocidade obtido no regime permanente com as simulações é apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Perfil de velocidade na câmara de secagem.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O perfil de velocidade com o regime de jorro estabelecido assume maiores velocidades na região de jorro e na saída, devido à redução da área de fluxo de ar, a velocidade máxima alcançada é de  $27,25 \text{ m s}^{-1}$ .

Velocidades menores são observadas próximo à parede da câmara devido à condição de aderência ( $v = 0$ ), assim como observado por Salikov (2015) que modelou e simulou a secagem em leito de jorro prismático e obteve como resultado maiores velocidades do fluxo de ar na região de jorro e velocidades baixas próximas a parede da câmara de secagem. A velocidade média da região de leito de jorro é de  $6,14 \text{ m s}^{-1}$ .

Ainda é possível observar as setas de superfície que mostram o fluxo ascendente do ar na região de jorro do secador, quando a altura máxima dos inertes ( $H_{\text{max}}$ ) é alcançada a sua velocidade é nula, retornando para a região cônica, gerando um fluxo descendente próximo as paredes da câmara de secagem, criando uma região de recirculação, que representa o movimento de leito de jorro observado experimentalmente.

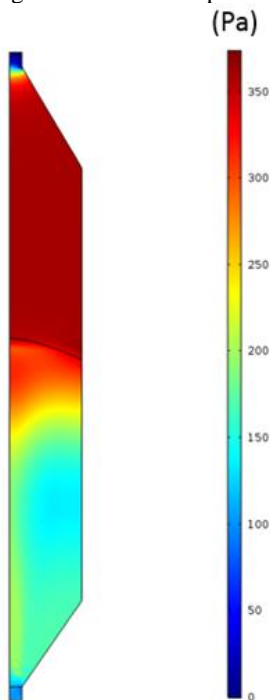
Karimi (2015) em seu trabalho de secagem em leito de jorro identificou as zonas formadas no regime de leito estabelecido, mostrando que a região de jorro é uma região com pequena distribuição de partículas inertes e a zona de circulação, é uma região de alta densidade de partículas

inertes, assim como observado nos resultados experimentais e nas simulações realizadas.

### 4.3.2 Perfil de pressão

O perfil de pressão obtido é apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Perfil de pressão na câmara de secagem



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

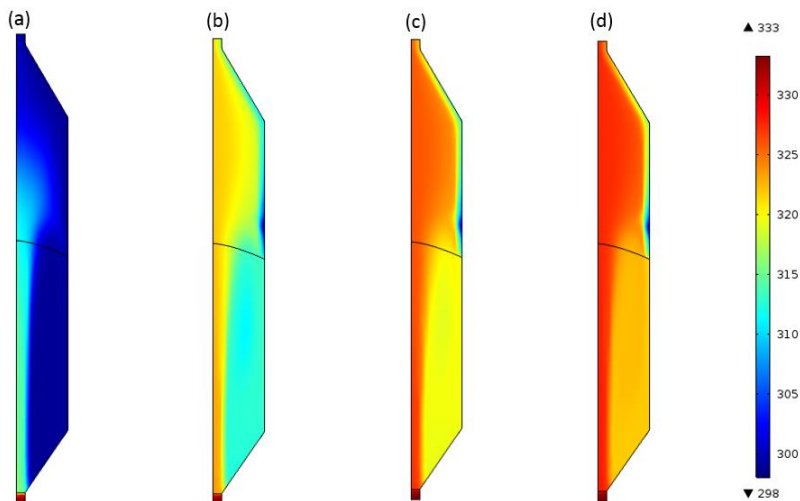
A queda de pressão é medida entre a saída e entrada da câmara de secagem, o valor da queda de pressão obtido nos ensaios experimentais é de 82 Pa, a queda de pressão resultante das simulações no regime estacionário foi de 84 Pa.

Apesar do perfil de pressão ser crescente ao longo da câmara de secagem, o fluxo do escoamento se encontra no sentido ascendente, pois na saída há uma redução brusca da pressão devido à redução da área de fluxo.

### 4.3.3 Perfil de temperatura

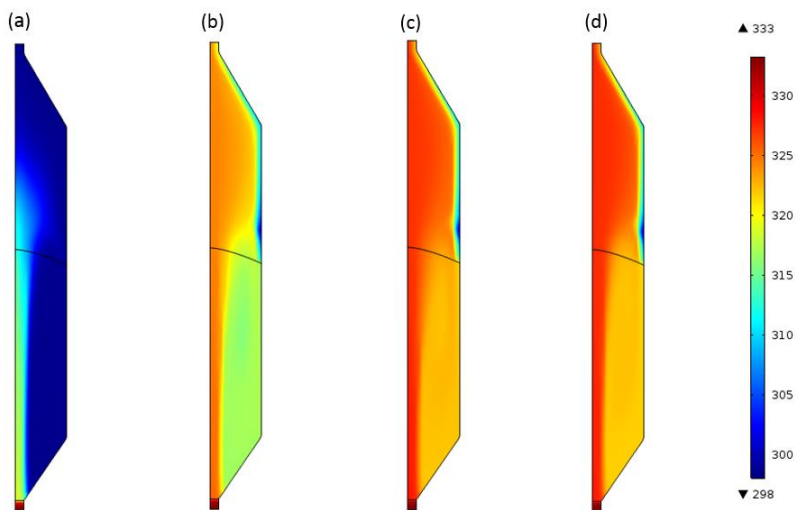
Os perfis de temperatura ao longo da espessura do domínio considerado podem ser observados em distintos tempos, nas Figuras 34-37.

Figura 34 – Perfil de temperatura ao longo da câmara de secagem para a condição de secagem de 333 K e  $0,25 \text{ mL min}^{-1}$  em diferentes tempos do processo: a) 0.1 s, b) 5 s, c) 10 s e d) 500 min.



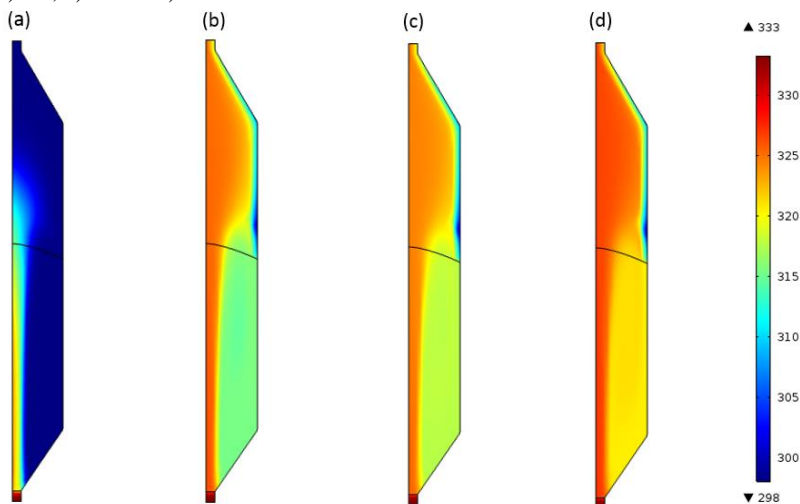
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 35 – Perfil de temperatura ao longo da câmara de secagem para a condição de secagem de 333 K e  $0,45 \text{ mL min}^{-1}$  em diferentes tempos do processo: a) 0.1 s, b) 5 s, c) 10 s e d) 320 min.



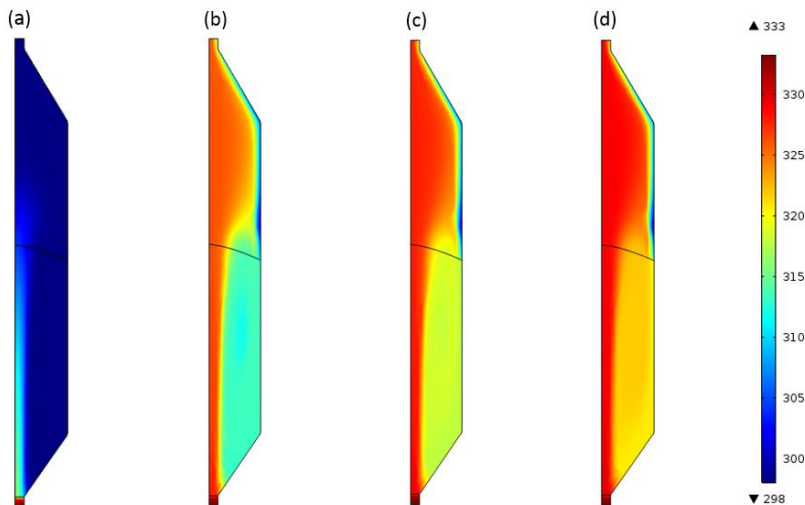
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 36 – Perfil de temperatura ao longo da câmara de secagem para a condição de secagem de 333 K e  $0,6 \text{ mL min}^{-1}$  em diferentes tempos do processo: a) 0.1 s, b) 5 s, c) 10 s e d) 220 min.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 37 – Perfil de temperatura ao longo da câmara de secagem para a condição de secagem de 333 K e  $0,8 \text{ mL min}^{-1}$  em diferentes tempos do processo: a) 0,1 s, b) 5 s, c) 10 s e d) 180 min



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O perfil de temperatura para todas as vazões de alimentações testadas possuem comportamento semelhante, apresentando uma variação no perfil de temperatura ao final da secagem no leito bastante significativa. Por possuir uma alta velocidade na região de jorro, já no instante 0,1s se observa um aumento expressivo da temperatura nesta região, com valores em torno de 315K. Observa-se através do perfil estabelecido em todas as vazões testadas que a temperatura é menor na região de recirculação, por ser uma região de umidade elevada, resultado observado também por Hosseni (2015).

Devido ao fluxo descendente quando se atinge a região fonte (região de recirculação), uma resistência a passagem do ar é formada próximo a parede na região acima da região fonte, com valores muito baixos da velocidade, resultando como observado em temperaturas menores dentro da câmara próximo à parede.

Os valores médios na saída da câmara de secagem obtidos com a simulação e experimentalmente para todas as vazões testadas estão dispostos na Tabela 23 com os seus respectivos erros padrão.



Tabela 23 – Valor médio da temperatura na saída da câmara de secagem e o erro padrão para todas as vazões testadas.

Vazão (mL min <sup>-1</sup> )	Simulação		Experimental	
	Temperatura (K)	Erro Padrão	Temperatura (K)	Erro Padrão
<b>0,25</b>	322,76	0,009	322,26	0,078
<b>0,45</b>	323,75	0,084	323,41	0,096
<b>0,60</b>	322,53	0,023	321,35	0,197
<b>0,80</b>	321,97	0,026	322,14	0,267

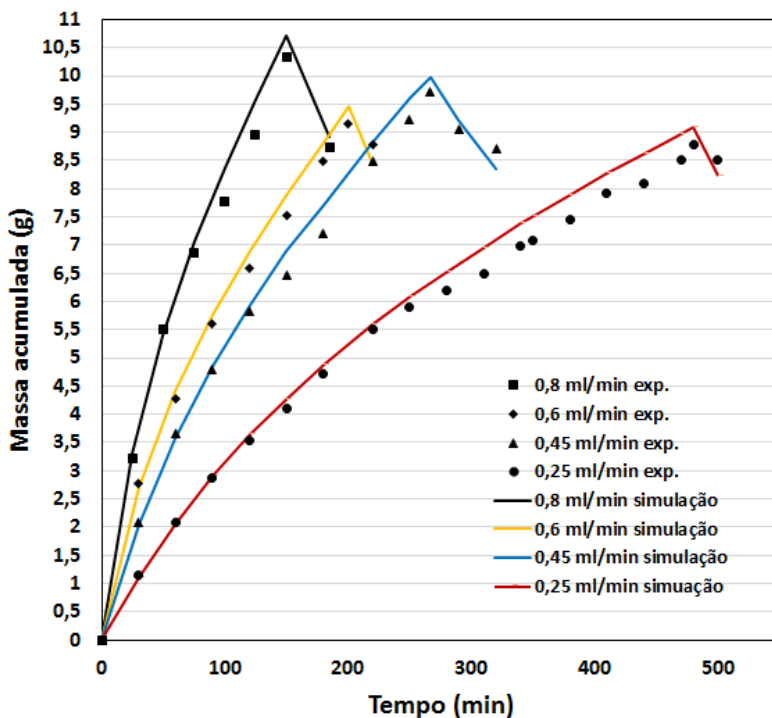
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Como pode-se observar a partir da Tabela 23 os valores da temperatura na saída da câmara de secagem obtidos com a simulação e experimental são semelhantes, com um baixo valor de erro padrão. A temperatura média diminui em torno de 10,8 K em relação a temperatura de entrada que é de 333,15K, pois calor é cedido por trocas com o meio externo.

É importante ressaltar que a medição da temperatura durante os ensaios experimentais foi realizada na saída do ciclone, pois no secador utilizado não é possível medir a temperatura na saída da câmara de secagem.

Na Figura 38 é apresentado a comparação das curvas experimentais e simuladas referentes a massa acumulada na câmara de secagem para cada vazão testada.

Figura 38– Curvas experimentais e simuladas da massa acumulada na câmara de secagem em função do tempo total de secagem.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

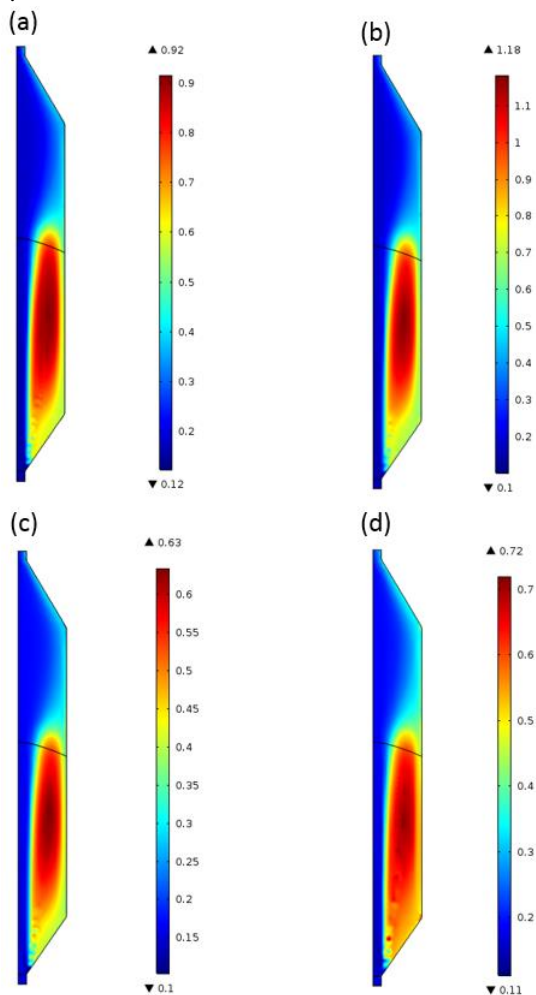
Conforme observado na Figura 38, os resultados obtidos na simulação são bastantes próximos aos obtidos através da secagem experimental. Este comportamento permite afirmar que o modelo matemático desenvolvido descreve com veracidade o comportamento do sólido na câmara de secagem.

O comportamento da massa acumulada durante toda a taxa de alimentação é crescente em todas as vazões testadas, somente quando a alimentação é encerrada é que se verifica uma diminuição da massa acumulada. Após o fim da alimentação uma quantidade de pó que ainda está aderida aos inertes e as paredes da câmara se desprendem durante a secagem, sendo coletada posteriormente no ciclone. O modelo descreve e reproduz de forma satisfatória a massa acumulada na secagem da microalga.

### 4.3.4 Perfil de concentração de vapor

Na Figura 39 é apresentado os perfis de concentração de vapor médio ao final da secagem para todas as vazões empregadas.

Figura 39– Perfil de concentração de vapor ao final da secagem nas respectivas vazões, a)  $0,25 \text{ mL min}^{-1}$ , b)  $0,45 \text{ mL min}^{-1}$ , c)  $0,60 \text{ mL min}^{-1}$  e d)  $0,80 \text{ mL min}^{-1}$ .



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Como observado na Figura 39, à região de recirculação por possuir massa de microalga aderida ao inerte apresenta um umidade elevada. Na região de jorro (região central) a umidade média é de  $0,16 \text{ mol m}^{-3}$  bem menor em comparação com a região de recirculação, pois nessa região se encontra maiores velocidades de escoamento do ar e todo vapor produzido é arrastado para a saída da câmara de secagem.

Nota-se um comportamento bem semelhante nos perfis de concentração nas vazões testadas. A concentração média de vapor na saída da câmara obtida experimentalmente e na simulação é apresentada na Tabela 24.

Tabela 24 – Valor médio da concentração na saída da câmara de secagem e o erro padrão para todas as vazões testadas.

<b>Vazão</b> (mL min <sup>-1</sup> )	<b>Simulação</b>		<b>Experimental</b>	
	<i>Concentração de vapor (mol m<sup>-3</sup>)</i>	<i>Erro Padrão</i>	<i>Concentração de vapor (mol m<sup>-3</sup>)</i>	<i>Erro Padrão</i>
<b>0,25</b>	0,273	0,001	0,172	0,003
<b>0,45</b>	0,293	0,002	0,213	0,004
<b>0,60</b>	0,226	0,001	0,190	0,006
<b>0,80</b>	0,271	0,001	0,192	0,011

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Como pode-se observar a partir da Tabela 24 os valores da concentração de vapor na saída da câmara de secagem são maiores que a concentração de entrada ( $0,15 \text{ mol m}^{-3}$ ) em todas as vazões testadas, tanto para os resultados experimentais quanto os obtidos com a simulação.

O erro padrão obtido apresenta-se pequeno em todas as medições, porém os valores da concentração de vapor obtidos com a simulação são maiores. Essa diferença encontrada provavelmente é causada pelo tempo de resposta do termo higrômetro, o qual é usado para obtenção da temperatura na saída da câmara e da umidade relativa. Também vale assinalar a ocorrência de pequenas variações na velocidade de escoamento do ar durante os ensaios experimentais.

## 5 CONCLUSÃO

O comportamento fluidodinâmico obtido com a secagem em leito de jorro da microalga *Scenedesmus acuminatus* não está de acordo com o observado pela maioria dos autores consultados na literatura, pois para o sistema em estudo, o aumento da velocidade do ar para valores além do aparecimento do jorro resultou em um aumento na queda de pressão. Acredita-se que a causa deste comportamento está relacionada ao distribuidor do ar na entrada da câmara de secagem, o qual produz uma perda de carga elevada. Este fato, no entanto, não interferiu na execução dos experimentos.

O melhor resultado na secagem das microalgas em leito de jorro foi obtido no experimento realizado com a vazão de alimentação de  $0,8 \text{ mL min}^{-1}$ , com base nos indicadores de desempenho do processo de secagem, recuperação de produto ( $R_p$ ), eficiência na produção de pó ( $\eta_{pó}$ ) e o baixo valor de massa acumulada na câmara de secagem ( $m_{ac}$ ).

A modelagem fenomenológica e simulação realizada para a secagem da microalga *Scenedesmus acuminatus* em leito de jorro apresentou um comportamento qualitativamente compatível com os experimentos. Além disso, o estudo computacional permitiu a representação dos perfis de velocidade, pressão, temperatura e concentração de vapor no domínio de cálculo de forma satisfatória.

Os perfis de temperatura permitiram a visualização detalhada do processo de aquecimento da pasta ao longo do tempo e de sua distribuição ao longo da câmara de secagem.

Os perfis de concentração de vapor representaram de forma consistente o comportamento da região de recirculação obtida com o regime de leito estabelecido, em que a pasta de microalga é aderida ao inerte resultando em uma umidade elevada nesta região.

Com as vazões empregadas nos ensaios realizados, pode-se concluir que uma quantidade de massa sempre é acumulada na câmara de secagem, até que a alimentação seja cessada. A comparação entre os resultados simulados e experimentais da massa acumulada na câmara foi representado de maneira satisfatória, validando assim, o modelo empregado.

A técnica em leito de jorro empregada mesmo que com algumas limitações, apresentou bons valores de produtividade, com um teor de umidade do produto final de acordo com as especificações comerciais exigidas, abaixo de 10%.



## 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;
- 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.
- Estudar uma possível aplicação para biomassa produzida na secagem em leito de jorro.





## REFERÊNCIAS

ADEODATO, Melissa Gurgel. **Análise da fluidodinâmica de leito de jorro durante o recobrimento de partículas.** 2003. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

AHSAN, Muhammad. Numerical analysis of friction factor for a fully developed turbulent flow using  $k-\epsilon$  turbulence model with enhanced wall treatment. **Beni-suef University Journal of Basic and Applied Sciences**, [s.l.], v. 3, n. 4, p.269-277, dez. 2014.

ALVAREZ, Jon et al. Fast co-pyrolysis of sewage sludge and lignocellulosic biomass in a conical spouted bed reactor. **Fuel**, [s.l.], v. 159, p.810-818, nov. 2015.

APRAJEETA, J.; GOPIRAJAH, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C.. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. **Journal Of Food Engineering**, [s.l.], v. 144, p.119-128, jan. 2015.

ARTETXE, Maite et al. Styrene recovery from polystyrene by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Waste Management**, [s.l.], v. 45, p.126-133, nov. 2015.

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, Ana I. et al. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 41, p.1489-1500, jan. 2015.

BAUMGARTNER, Tatiana Rodrigues da Silva et al. Avaliação da produtividade da microalga *Scenedesmus acuminatus* (Lagerheim) Chodat em diferentes meios de cultivo. **Brazilian Journal of Biosciences**, v. 11, n. 2, p. 250–255, abril 2013.

BECKER, E. W. Micro-algae as a source of protein. **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 2, p.207-210, mar. 2007.

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

BORGES, Lucelia et al. Effects of flocculants on lipid extraction and fatty acid composition of the microalgae *Nannochloropsis oculata* and *Thalassiosira weissflogii*. **Biomass And Bioenergy**, [s.l.], v. 35, n. 10, p.4449-4454, out. 2011.

BRAGA, Mateus Boeira; ROCHA, Sandra Cristina dos Santos. Secagem de pasta alimentícia em leito de jorro: Avaliação dos aspectos energéticos e produção. **Congresso brasileiro de sistemas particulados**, p. 1–10, out. 2015.

ÇENGEL, Y. A., GHAJAR, A.J. **Heat and mass transfer**. Fundamentals & Applications. 5<sup>th</sup> ed. McGraw Hill education, 2015.

CHANDRA, T. Sarat et al. Evaluation of indigenous fresh water microalga *Scenedesmus obtusus* for feed and fuel applications: Effect of carbon dioxide, light and nutrient sources on growth and biochemical characteristics. **Bioresource Technology**,[s.l.], v. 207, p.430-439, maio 2016.

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

CHIELLE, D. P. et al. Spouted bed drying of papaya seeds for oil production. **LWT - Food Science and Technology**, v. 65, p. 852–860, 2016.

COMSOL. **COMSOL Multiphysics® reference guide**. Version 5.0. 2015.

COSTA, Lílian Moreira et al. Isotermas e calor isostérico de sementes de *Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, n. 3, p. 516–523, jul. – set. 2015.

DANTAS, Danielle Matias de Macêdo. **Atividades biológicas das preparações obtidas das Clorófitas *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus subspicatus* chodat e suas potenciais aplicações biotecnológicas**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Biológicas, Centro de Ciências

Biológicas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

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

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

DIAS, Leandro Gonçalves. **Estudo processo de secagem em estufa e por microondas de compósitos cerâmicos de argila e resíduos de esteatito**. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Térmica e dos Flúidos, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2013.

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.

DIEB, J. T. et al. Análise das taxas de evaporação e eficiência térmica do secador de leito de jorro, p. 284-289 . In: . São Paulo: Blucher, 2013.

DISCONZI, Fernanda Perazzolo. **Análise numérica da transferência de calor no interior de cilindros de compressores alternativos de refrigeração doméstica**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Térmicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DISSA, A. O. et al. Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of spirulina. **Journal of Food Engineering**, [s.l.], v. 97, n. 3, p.410-418, abr. 2010.

DOTTO, Guilherme Luiz et al. Influence of Drying Techniques on the Characteristics of Chitosan and the Quality of Biopolymer Films. **Drying Technology**, [s.l.], v. 29, n. 15, p.1784-1791, dez. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2011.60281>.

DU, Wei et al. Pressure drop and pressure fluctuations in spouted beds with binary mixtures of particles. **Powder Technology**, [s.l.], v. 276, p.134-143, maio 2015.

FIORENTIN, Leila Denise et al. Determinação da cinética e das isotermas

de secagem do bagaço da laranja. **Acta Scientiarum Technology**. n. 2002, p. 147–152, 2010.

FUJITA, Alice et al. Impact of spouted bed drying on bioactive compounds, antimicrobial and antioxidant activities of commercial frozen pulp of camu-camu (*Myrciaria dubia* Mc. Vaugh). **Food Research International**, [s.l.], v. 54, n. 1, p.495-500, nov. 2013.

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

HEUERT, Jenifer; KHATCHATOURIAN, Oleg. Interação entre jatos transversais e fluxo Principal: Simulação e análise comparativa de modelos de turbulência. In: **Anais do XXX Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional**. Florianópolis: Blucher, 2007.

HOSSEINI, Seyyed Hossein; FATTAHI, Mohsen; AHMADI, Goodarz. Hydrodynamics studies of a pseudo 2D rectangular spouted bed by CFD. **Powder Technology**, [s.l.], v. 279, p.301-309, jul. 2015.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6<sup>th</sup> ed. Editora LTC. p. 997, 2007.

JONES, W. P; LAUNDER, B. E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 15, n. 2, p.301-314, fev. 1974.

KARIMI, Hossein; DEHKORDI, Asghar Molaei. Prediction of equilibrium mixing state in binary particle spouted beds: Effects of solids density and diameter differences, gas velocity, and bed aspect ratio. **Advanced Powder Technology**, [s.l.], v. 26, n. 5, p.1371-1382, set. 2015.

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

LARRONDE-LARRETICHE, Mathieu; JIN, Xue. Microalgae (*Scenedesmus obliquus*) dewatering using forward osmosis membrane: Influence of draw solution chemistry. **Algal Research**, [s.l.], v. 15, p.1-8, abr. 2016.

LIMA, Ezenildo Emanuel *et al.* Estudo das isotermas e calor isostérico de

adsorção da farinha da coroa de frade. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. vol. 10, n. 2, p. 163-170, 2008.

LIU, Malin et al. Investigation of fluidization behavior of high density particle in spouted bed using CFD–DEM coupling method. **Powder Technology**, [s.l.], v. 280, p.72-82, ago. 2015.

LOPES, T. S. DE A. et al. Estudo do potencial de geração de biocombustíveis líquidos a partir de microalgas: Utilização de efluentes agroindustriais e domésticos no desenvolvimento da *Chlorella* sp. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 33, p. 25–36, 2015.

MACHADO, Izadora Pereira. **Avaliação térmica e desempenho do processo de secagem de misturas de graviola e leite em secador leito de jorro**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

MARRETO, Ricardo Neves. **Estudo da técnica de leito de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina**. 2006. 199 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Farmacêuticas, Programa de Pós-graduação em Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006

MASSARANI, Giulio. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2<sup>th</sup> ed. Rio de Janeiro: COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

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.

MATHUR, Kishan. B.; EPSTEIN, Norman. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974

MCCABE, Warren. L.; SMITH, Julian. C.; HARRIOTT, Peter. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5<sup>th</sup> ed. [s.l.]: McGraw Hill, p. 1130, 1993.

MEDEIROS, M. D. F. D. DE 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.

MEDEIROS, M.F.D. et al. Drying of pastes in spouted beds: influence of the paste composition on the material retention in the bed. **Drying**, v. C. São Paulo, p. 1529-1536, 2004.

MENEZES, Rafael Silva. **Estudo do potencial de microalgas dulcícolas como matéria-prima para a cadeia de produção de biodiesel**. 2015. 193 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Ambientais, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

MORAES FILHO, Francisco Canindé de. **Avaliação da aplicação de modelos para a secagem de pastas e suspensões em leito de jorro com alimentação contínua**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

MOSTAFA, S.S.M. Microalgal Biotechnology: Prospects and Applications. In: DHAL, N. K.; SAHU, S.C. **Plant Science**. [s.l.]: InTech, 2012. cap. 12.

MOSTOUFI, N.; KULAH, G.; KOKSAL, M. Flow structure characterization in conical spouted beds using pressure fluctuation signals. **Powder Technology**, v. 269, p. 392–400, 2015.

NASCIMENTO, Bruna de Souza. **Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leito de jorro**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

NGO, Ich-long; JEON, Sangwoo; BYON, Chan. Thermal conductivity of transparent and flexible polymers containing fillers: A literature review. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 98, p.219-226, jul. 2016.

OLAZAR, Martin et al. Modelling batch drying of sand in a draft-tube conical spouted bed. **Chemical Engineering Research And Design**, [s.l.], v. 89, n. 10, p.2054-2062, out. 2011.

OLIVEIRA, E. G. et al. Moisture sorption characteristics of microalgae *Spirulina platensis*. **Brazilian Journal Of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.189-197, mar. 2009.

OLIVEIRA, Amanda Cristina de. **Produção de biomassa de microalgas *Scenedesmus sp.* em efluente de bovinocultura biodigerido**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PARK, Kil Jin 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, Robert H.; GREEN, Don W. **Perry's chemical engineers' handbook**. 8<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, p. 2735, 2007.

PERUSSELLO, Camila Augusto. **Análise numérica e experimental da secagem osmo-convectiva do Yacon (*Smallanthus sonchifolius*)**. 2013. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

RAO, M. A. et al. **Engineering Properties of Foods**. 4<sup>th</sup> ed. New York: CRC Press, 2014.

RESENDE, Osvaldo et al. Isotermas e calor isotérico de sementes de *Buchenavia capitata* ( Vahl ). **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, n. 3, p. 516–523, 2015.

SALIKOV, Vitalij et al. Investigations on the spouting stability in a prismatic spouted bed and apparatus optimization. **Advanced Powder Technology**, [s.l.], v. 26, n. 3, p.718-733, maio 2015.

SALMWEND, E. et al. Characterization of Two Different Stumps of *Spirulina platensis* Drying : Assessment of Water Transport Coefficient. **Food Sciences and Nutrition**, 2015.

SANTOS, Rossane Mailde. **Estudo da secagem e do consumo de gás natural em uma Rama têxtil de aquecimento direto**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro

Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SIMIONI, Taysnara. **Estudo comparativo da secagem de microalgas *Scenedesmus acuminatus* em camada delgada e leito de jorro**. 2015. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SOPADE, P. A.; AJISEGIRI, E. S.; ABASS, A. B. **Moisture sorption study on nigerean foods: kuka**. J. stored Prod. Res., vol. 30, n. 4, p. 331-338, 1994.

SOUZA, Josilma Silva de. **Secagem de misturas de polpa de frutas tropicais em leito de jorro**. 2009. 178 f. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SOUZA, José Francisco Almeida de et al. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Rev. Bras. Geof.**, [s.l.], v. 29, n. 1, p.21-41, mar. 2011.

SOUZA, Silvio José Ferreira de. **Estudo da atividade de água em co-produtos da indústria de sucos : sementes de maracujá , casca de laranja e cascas**. 2015. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência de Alimentos, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2015.

SOUZA, Robson Costa de; FREIRE, Fabio Bentes; FREIRE, José Teixeira. Análise da cinética de atrição de partículas esféricas no leito de jorro convencional, p. 1-8 . In: **In Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2015 [=Blucher Engineering Proceedings]**. São Paulo: Blucher, 2015.

SUALI, Emma; SARBATLY, Rosalam. Conversion of microalgae to biofuel. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**,[s.l.], v. 16, n. 6, p.4316-4342, ago. 2012.

TIENDREBEOGO, E. S. et al. Characterization of Two Different Stumps of *Spirulina platensis* Drying : Assessment of Water Transport Coefficient. **Food Sciences and Nutrition**, v. 6, p. 1437–1449, 2015.

VELÁZQUEZ-GUTIÉRREZ, Sandra Karina et al. Sorption isotherms,



thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (*Salvia hispanica* L.). **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 121, p.411-419, maio 2015

WANG, Xiaolong et al. The Application of COMSOL Multiphysics in Direct Current Method Forward Modeling. **Procedia Earth And Planetary Science**, [s.l.], v. 3, p.266-272, 2011.

WEISE, F., SCHOLL, S. **Evaporation of pure liquids with increase viscosity in a falling film evaporator**. *Heat Mass Transfer*, v. 45, p. 1037 – 1046, 2009.

WELTY, James R. et al. **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer**. 5<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2008.