

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DANIELLE GONÇALVES FILHO

AVALIAÇÃO DO USO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) EM *SPRAY*
DRYERS

PATOS DE MINAS
2017

DANIELLE GONÇALVES FILHO

AVALIAÇÃO DO USO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) EM *SPRAY*
DRYERS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia - *Campus* Patos de Minas como requisito de avaliação da disciplina de Trabalho de Conclusão do Curso II.

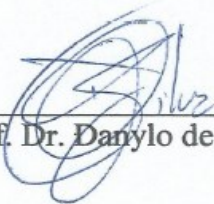
Orientador: Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva

PATOS DE MINAS
2017

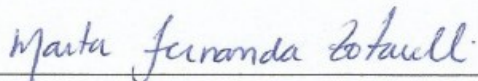
AVALIAÇÃO DO USO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) EM *SPRAY*
DRYERS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado
para obtenção do Título de Engenheira de
Alimentos da Universidade Federal de
Uberlândia *Campus* Patos de Minas, pela a
banca examinadora, formada por:

Patos de Minas, 19 de Dezembro de 2017.



Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva, UFU/MG



Prof.ª Dr.ª Marta Fernanda Zotarelli, UFU/MG



Diego de Sousa Bernardes, UFU/MG

*Dedico este trabalho aos meus pais, Manoel e
Sueli, e à minha irmã Gracielle.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem o apoio e incentivo de meus queridos pais, Manoel e Sueli, e da minha irmã Gracielle.

Meus agradecimentos a todos os meus colegas e professores, pela dedicação e pelos os momentos enriquecedores e de descontração. Agradeço, também, a todos os meus amigos e familiares pela compreensão de minha ausência em momentos importantes.

Por fim, agradeço a Deus pela dádiva de me permitir viver experiências tão extraordinárias que trouxeram ensinamentos que vou levar por toda a vida.

RESUMO

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma ferramenta de simulação que utiliza computadores com alta capacidade de processamento e aplica modelos matemáticos para a simulação de padrões de escoamento de fluidos, possibilitando prever perfis de velocidade, temperatura, pressão, dentre outros parâmetros específicos do sistema estudado. Desta maneira, o objetivo do trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação do CFD, além disso, estudar os modelos utilizados em simulações de *spray dryers* em CFD e selecionar um dos artigos encontrados durante a revisão da literatura e tentar reproduzir a simulação do(s) autor(es). A técnica de CFD é amplamente utilizada em indústrias automotivas, aeroespaciais e nucleares, mas apenas nos últimos anos passou a ser empregada na indústria de alimentos. Sua principal vantagem é a possibilidade de otimizar processos, gerando uma economia de custos e melhoria da qualidade dos alimentos. Esta ferramenta tem sido muito empregada em estudos que investigam o efeito do escoamento de ar no interior de *spray dryers*. Desta forma, para compreender como é feita a modelagem em CFD do *spray dryer*, um trabalho da literatura foi escolhido, e a partir dos dados fornecidos realizou-se uma simulação. Os resultados da simulação foram promissores, apesar de não ter sido possível reproduzir todos os perfis apresentados no trabalho.

Palavras Chave: Simulação, Secagem, Atomização, Revisão.

ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a simulation tool that uses computers with high processing capacity and applies mathematical models for the simulation of fluid flow patterns, making it possible to predict velocity, temperature and pressure profiles, among other specific parameters of the studied system. In this way, the objective of the work was to perform a bibliographic review on the application of CFD, moreover, to study the models used in simulations of spray dryers of CFD and select one the papers found during a literature review and try to reproduce the simulation makes (if) author(s). The CFD technique is widely used in automotive, aerospace and nuclear industries, but only in recent years has it become employed in the food industry. Its main advantage is the possibility of optimizing processes, generating cost savings and improving food quality. This tool has been heavily employed in studies investigating the effect of air flow in indoor spray dryers. In this way, to understand how the CFD modeling of the spray dryer is done, a paper of the literature was chosen, and from the data provided there was an attempt of simulation. The results of the simulation were promising, although it was not possible to reproduce all the profiles presented in the paper.

Keywords: Simulation, Drying, Atomization, Review.

Lista de Símbolos

g	Aceleração da gravidade (m s^{-2})
σ_k	Constante do modelo de turbulência
σ_ε	Constante do modelo de turbulência
σ_y	Constante do modelo de turbulência
σ_h	Constante do modelo de turbulência
C_1	Constante do modelo de turbulência
C_2	Constante do modelo de turbulência
x	Coordenada espacial (m)
ρ	Densidade específica (kg m^{-3})
L	Diâmetro do tubo (m)
k	Energia cinética turbulenta ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
h	Entalpia específica (J kg^{-1})
u	Flutuações na velocidade (devido à turbulência) (m s^{-1})
F	Força (N)
Y_V	Fração mássica de vapor presente no ar
G_k	Geração de turbulência ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-3}$)
Re	Número de Reynolds
p	Pressão (Pa)
ε	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta ($\text{m}^2 \text{s}^{-3}$)
S_h	Taxa de energia ($\text{J m}^{-3} \text{s}^{-1}$)
S_c	Taxa mássica ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)
T	Temperatura (K)
t	Tempo(s)
U	Vetor Velocidade (m s^{-1})
ν	Viscosidade cinemática ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
μ	Viscosidade dinâmica ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
μ_e	Viscosidade efetiva ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
μ_t	Viscosidade turbulenta ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
2	DESCRIÇÃO DA SECAGEM EM <i>SPRAY DRYER</i>	14
2.1	<i>Spray Drying</i>	14
2.1.1	<i>Atomização</i>	15
2.1.2	<i>Contato entre Gotículas e Ar de Secagem</i>	16
2.1.3	<i>Cinética de Secagem</i>	17
2.1.4	<i>Separação do Produto</i>	18
2.2	<i>Configurações de Spray Dryers</i>	18
3	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	20
3.1	<i>Modelos Multifásicos</i>	22
3.1.1	<i>Abordagem Euleriana-Euleriana</i>	22
3.1.2	<i>Abordagem Euleriana-Lagrangiana</i>	23
3.2	<i>Princípios da Conservação</i>	24
3.2.1	<i>Equação da Continuidade</i>	24
3.2.2	<i>Equação do Movimento</i>	24
3.2.3	<i>Equação da Energia</i>	25
3.2.4	<i>Equação de Conservação das Espécies</i>	25
3.2.5	<i>Trajetória das Partículas</i>	26
3.3	<i>Transferência de Calor</i>	26
3.4	<i>Modelos de Turbulência</i>	27
3.4.1	<i>Modelos de Duas Equações</i>	28
3.4.1.1	<i>Modelo $k-\epsilon$ Padrão</i>	28
3.4.1.2	<i>Modelo RNG $k-\epsilon$</i>	30
3.4.1.3	<i>Modelo $k-\epsilon$ Realizável</i>	30
3.4.2	<i>Modelo dos Tensores de Reynolds (RSM)</i>	30
4	METODOLOGIA	32

4.1	<i>Pré-processamento</i>	32
4.1.1	<i>Simulação de um Trabalho da Literatura</i>	33
4.1.1.1	<i>Geometria</i>	33
4.1.1.2	<i>Malha</i>	34
4.1.1.3	<i>Condições de Contorno</i>	36
4.2	<i>Processamento</i>	36
4.3	<i>Pós-processamento</i>	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	<i>Simulação com base no trabalho de Mezhericher; Levy; Borde (2012)</i>	38
6	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A secagem é uma operação unitária definida como a remoção de água presente nos alimentos por evaporação, por meio da aplicação de calor sob condições controladas. É uma operação muito utilizada na indústria de alimentos, pois prolonga a vida útil dos devido à redução da atividade de água, o que causa a inibição do crescimento microbiano e da atividade enzimática. Outra vantagem da secagem é a redução do peso e volume dos produtos, diminuindo de forma significativa os custos de acondicionamento e transporte (FELLOWS, 2006).

A secagem por pulverização ou *spray drying* é um dos métodos de secagem mais adequados para transformar substâncias líquidas em pequenas partículas, sendo muito empregado em vários segmentos industriais. Na indústria de alimentos, por exemplo, utilizando este processo são produzidos: soro de leite, café instantâneo, leite, chás e sopas em pó, além disso, a secagem também é empregada na indústria farmacêutica na produção de enzimas, fungos e bactérias (KURIAKOSE; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2010; SALEH, 2010).

O *spray dryer* é uma câmara de secagem onde a suspensão é alimentada e pulverizada por meio um bico atomizador, as gotículas entram em contato com o ar de secagem e se transformam em partículas pela evaporação de água, as principais vantagens da utilização deste equipamento são (KIEVIET, 1997; KURIAKOSE; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2010; XIA; SUN, 2002):

- Operar de forma contínua e em uma ampla gama de temperaturas;
- Elevadas taxas de secagem, uma vez que a pulverização de um líquido no interior da câmara aumenta sua área de contato com o ar de quente facilitando a troca de calor e massa tornando o processo de secagem rápido;
- Curtos tempos de residência, permitindo a secagem de alimentos termolábeis, além de pouca perda de compostos voláteis (aroma).

Apesar de muito empregados em processos industriais, os *spray dryers* são projetados principalmente com base em medidas experimentais obtidas de equipamentos em escala piloto (SALEH, 2010); entretanto, de acordo com Fletcher et al. (2006), medidas exclusivamente experimentais não são suficientes para compreender os fenômenos de transferência de calor, massa e movimento que envolvem o processo de secagem, inviabilizando a previsão dos parâmetros de secagem e otimização do processo. Desta maneira, os resultados obtidos em

escala industrial podem muitas vezes, não ser tão satisfatórios como os obtidos em escala piloto.

Nas últimas décadas, ocorreram muitos avanços na área da computação que proporcionaram a construção de máquinas mais robustas e com grande poder de processamento, permitindo assim a criação de vários tipos de softwares de engenharia. Dentre eles, destacam-se softwares capazes criar modelos computacionais para prever o comportamento do escoamento de fluidos. A Fluidodinâmica Computacional (da sigla, em inglês, CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta de simulação que utiliza modelos matemáticos para simular o perfil de escoamento de fluidos, que possibilita prever como ocorrerá a transferência de calor, massa e movimento dos fluidos que escoam em um volume de controle e, através disso, é possível otimizar projetos em diversos processos industriais.

Segundo Kuriakose & Anandharamakrishnan (2010), o CFD tem sido muito utilizado pela comunidade científica, devido à possibilidade de criar modelos matemáticos que são capazes de prever os fenômenos físicos que acontecem durante o processo. Os dados sobre o processo geralmente que são demorados e caros de se obter por meio de ensaios experimentais; logo, a técnica de CFD leva a uma economia de tempo e recursos.

No entanto, apesar de amplamente utilizado em indústrias automotivas, aeroespaciais e nucleares, apenas nos últimos anos o CFD passou a ser empregado em processos na indústria de alimentos (SCOTT; RICHARDSON, 1997), devido a algumas limitações experimentais e analíticas, como:

- Elevados custo e tempo gasto na realização de experimentos, que muitas vezes resultam em poucas informações sobre o processo estudado tornando os ensaios experimentais pouco eficientes;
- A adoção de simplificações, generalizações e aproximações que tornam os modelos analíticos pouco eficientes em desenvolver modelos para descrever os perfis de escoamentos de forma mais abrangente.

Estas limitações, combinadas com os avanços recentes no desenvolvimento de soluções numéricas para resolução de equações de mecânica dos fluidos e o aprimoramento do poder e eficiência de computação, demonstram que a aplicação da técnica de CFD é uma alternativa altamente viável na indústria de alimentos (SUN, 2007).

Alguns autores realizaram estudos e utilizaram a técnica de CFD para prever perfis de escoamento em vários tipos processos da indústria de alimentos. Dentre estes trabalhos temos:

1. Asteriadou et al. (2006) realizaram um estudo, em que investigam a interação entre alimentos e a geometria de uma tubulação em forma de “T”, para avaliar as condições higiênicas desta tubulação. Os autores aplicaram a técnica de CFD para prever parâmetros críticos tais como perfis de velocidade e temperatura para fluidos de baixa viscosidade. Nas avaliações preliminares realizadas, os resultados obtidos demonstraram que perfis de temperatura em fluxos laminares e turbulento, foram próximos aos perfis obtidos por meio de experimentos.
2. Chhanwal et al. (2010) criaram um modelo em 3D utilizando a técnica de CFD para um forno de aquecimento elétrico e investigaram três modelos de radiação diferentes: o modelo discreto de radiação de transferência (DTRM), superfície para superfície (SS) e ordenadas discretas (DO). De acordo com os autores, os três modelos tiveram resultados semelhantes com os dados obtidos de medidas experimentais, demonstrando a eficiência da utilização da técnica em várias áreas da indústria de alimentos.
3. Delele et al. (2009) estudaram o armazenamento de frutas refrigeradas por longos períodos, com o objetivo de reduzir perda de umidade e de qualidade. Nestes sistemas de refrigeração são empregados bicos de pulverização de alta pressão em salas de armazenamento com baixas concentrações de oxigênio. Foi desenvolvido um modelo de câmara fria baseado em CFD para prever a velocidade do ar da sala de armazenamento, as distribuições de temperatura, umidade e o destino das gotículas de água. Os resultados obtidos indicaram que a quantidade de água pulverizada depositada nas superfícies da pilha de frutas e da sala, dependia diretamente da pressão aplicada, da posição e da direção do bocal de pulverização. Os autores concluíram que o modelo possuía um bom ajuste entre os resultados medidos e previstos, podendo ser aplicado para simulações deste tipo.

Ultimamente a fluidodinâmica computacional também tem sido muito utilizada em estudos que investigam o efeito do escoamento do ar de entrada e no interior de câmaras de secagem, no processo de secagem por *spray dryer*. Dentre estes estudos, Harvie; Langrish; Fletcher (2002) constataram em simulações empregando CFD, que os padrões de escoamento de ar no interior da câmara de secagem influenciam diretamente na qualidade do produto obtido, uma vez que interferirá diretamente no tempo de residência, na umidade, na porosidade e no tamanho das partículas. Vários outros estudos utilizando CFD, demonstraram sua capacidade de prever muito mais que perfis de escoamento de ar e temperatura no interior na câmara de secagem, também foi possível obter previsões de trajetórias, diâmetro, umidade

e temperatura das partículas durante a secagem, demonstrando a importância da técnica de CFD para otimização da operação de secagem por *spray dryer*, que é um equipamento grande (em escala industrial), o que tornaria muito difícil e caro para se realizar medidas experimentais (KURIAKOSE; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2010; SUN, 2007; XIA; SUN, 2002).

Desta maneira, o objetivo geral deste trabalho será avaliar a aplicação da técnica de CFD em *spray dryers*, através de uma revisão da literatura. Como objetivos específicos, pretende-se:

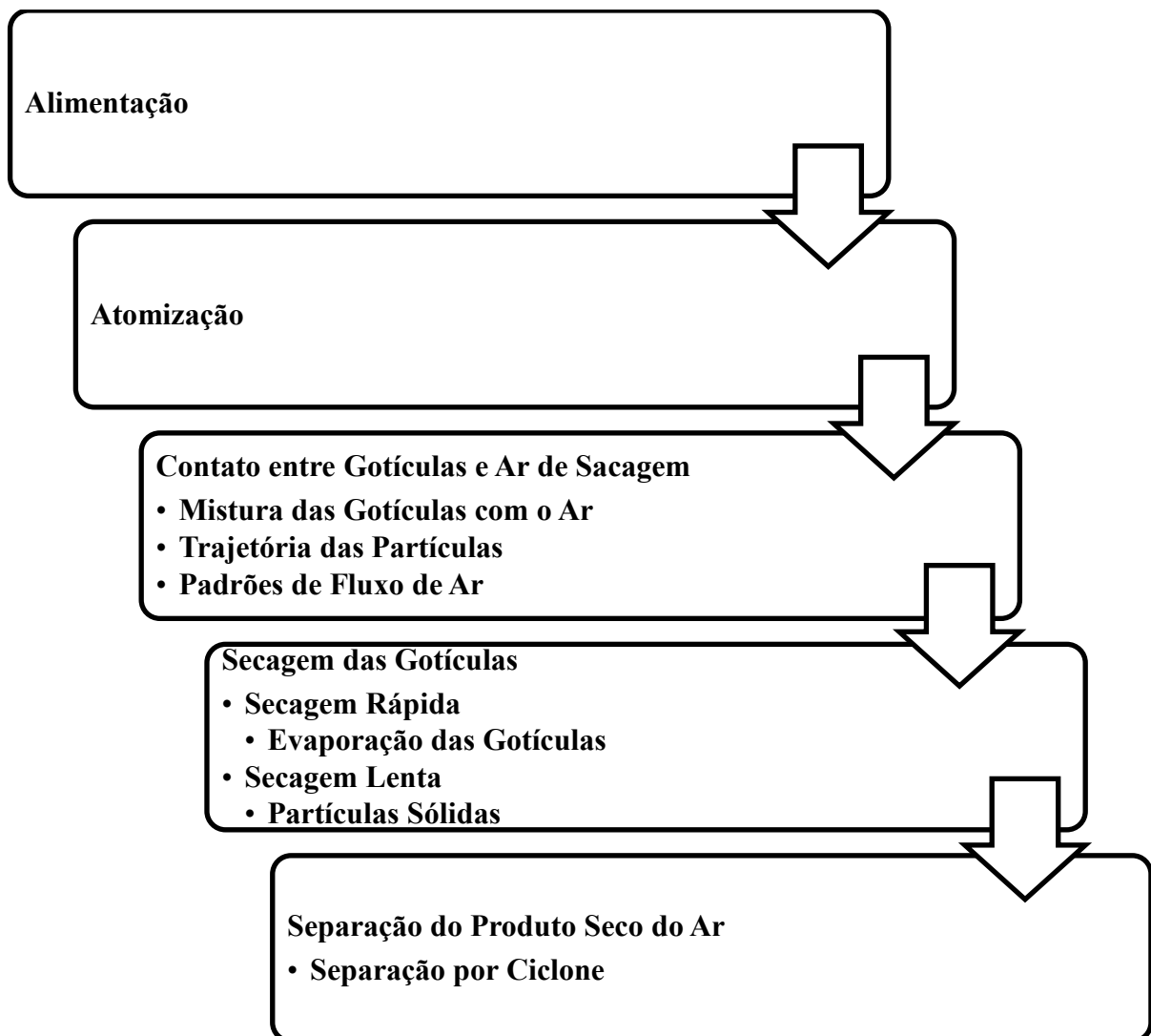
- Estudar os modelos utilizados em simulações de *spray dryers* em CFD;
- Selecionar um dos artigos encontrados durante a revisão da literatura e reproduzir a simulação do(s) autor(es).

2 DESCRIÇÃO DA SECAGEM EM *SPRAY DRYER*

2.1 *Spray Drying*

No processo de secagem por *spray drying* uma solução ou suspensão é alimentada e pulverizada por um bico atomizador, em pequenas gotículas no interior de uma câmara de secagem, onde entrará em contato direto com o ar aquecido, que fornecerá a energia necessária para a evaporação da água presente na suspensão, transformando as gotículas em partículas de pó, que posteriormente serão coletadas em um ciclone. As etapas do processo de secagem por pulverização, que ocorre no interior de um equipamento chamado *spray dryer*, são apresentadas na Figura 1 (VARZAKAS; THEODOROS; TZIA, 2015).

Figura 1 - Etapas do processo de secagem por *spray drying*



Fonte: Adaptado de Keshani et al. (2015).

2.1.1 Atomização

A atomização é a etapa mais importante de todo processo de secagem, pois o tamanho da gotícula influenciará diretamente na eficiência da secagem e no custo de operação do equipamento, ou seja, quanto maior for a gotículas mais demorada será a secagem, sendo necessário o prolongamento do tempo de secagem para se obter a umidade desejada do produto seco, o que pode afetar diretamente a qualidade do produto obtido (ROSA; TSUKADA; FREITAS, 20--?).

Nesta etapa o líquido alimentado é transformado em pequenas gotículas, para aumentar a superfície de contato entre o líquido e o ar aquecido, facilitando a secagem. Existem vários tipos de atomizadores e os mais utilizados são:

- Atomizador rotativo ou centrífugo: a suspensão é alimentada em uma cavidade no centro de um disco rotativo, que gira em alta rotação; devido à força centrífuga o líquido é acelerado da superfície do disco para a periferia e desintegra-se em pequenas gotículas. (ANANDHARAMAKRISHNAN; ISHWARYA, 2015; VARZAKAS; THEODOROS; TZIA, 2015).

Este atomizador é muito flexível podendo ser empregado em várias operações de secagem. As ranhuras que conduzem o fluido do centro para as laterais do disco são grandes, e isso faz com que o atomizador opere com baixas pressões de alimentação, mesmo para as soluções e suspensões viscosas (OAKLEY, 1997). No entanto, uma desvantagem do atomizador rotativo é que as gotículas são jogadas para fora do disco a altas velocidades, tornando necessária uma ampla câmara de secagem para assegurar que haja distância suficiente para que as gotículas sejam desviadas antes de atingir a parede da câmara (VARZAKAS; THEODOROS; TZIA, 2015).

- Atomizador de bico pressurizado: o líquido é alimentado em uma câmara em espiral, onde se aplica uma alta pressão forçando-o a passar através de uma pequena abertura formando gotículas (ANANDHARAMAKRISHNAN; ISHWARYA, 2015).

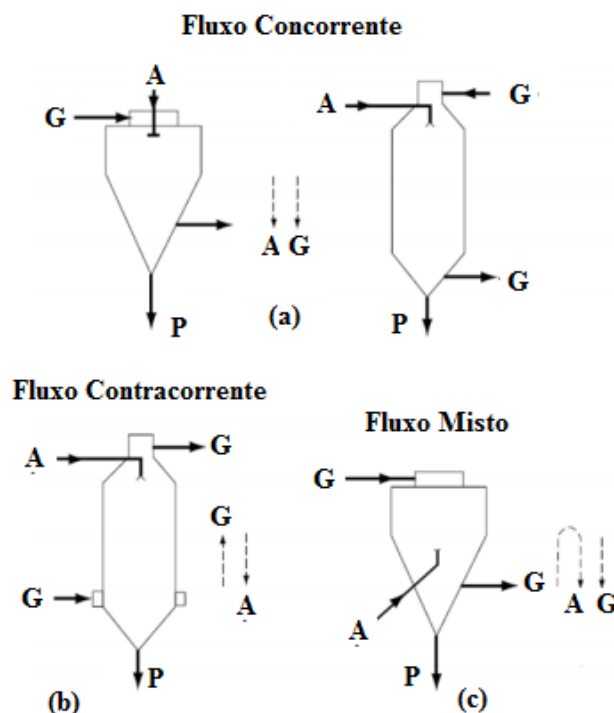
Segundo Filkova; Huang; Mujumdar (2015) este tipo de bico atomizador é capaz produzir gotículas em um estreito intervalo de diâmetros e as partículas obtidas após a secagem são geralmente esferas ocas. Além disso, este bico atomizador não é adequado para suspensões altamente concentradas e materiais abrasivos devido à sua tendência de entupir e danificar o orifício do bocal.

- Atomizador de bico de duplo fluido: a suspensão e o ar comprimido (ou vapor) são combinados em um bico de duplo fluido, a energia do gás comprimido é usada para atomizar a suspensão (ANANDHARAMAKRISHNAN; ISHWARYA, 2015). Este bico atomizador também possui as mesmas limitações do atomizador de bico pressurizado, uma vez que a alimentação de suspensões muito concentradas e materiais abrasivos pode danificar ou entupir o bico atomizador (FILKOVA; HUANG; MUJUMDAR, 2015).

2.1.2 Contato entre Gotículas e Ar de Secagem

As gotículas formadas pelo atomizador são dispersas e entram em contato direto com o ar aquecido na câmara de secagem, este fluxo de ar pode ser: (a) concorrente, em que o líquido pulverizado e o ar de secagem têm mesmo sentido de corrente (é o processo mais usado), (b) fluxo contracorrente, em que o líquido e o ar de secagem têm sentidos opostos de escoamento ou (c) uma junção dos dois tipos de fluxo concorrente e contracorrente como apresentado na Figura 2. O tipo de fluxo de ar utilizado influenciará diretamente na trajetória das partículas no interior da câmara (PASTORINO, 2016).

Figura 2 - Contato entre as gotículas pulverizadas e o ar de secagem. (a) Concorrente. (b) Contracorrente. (c) Fluxo Misto. A: alimentação; G: gás; P: produto.



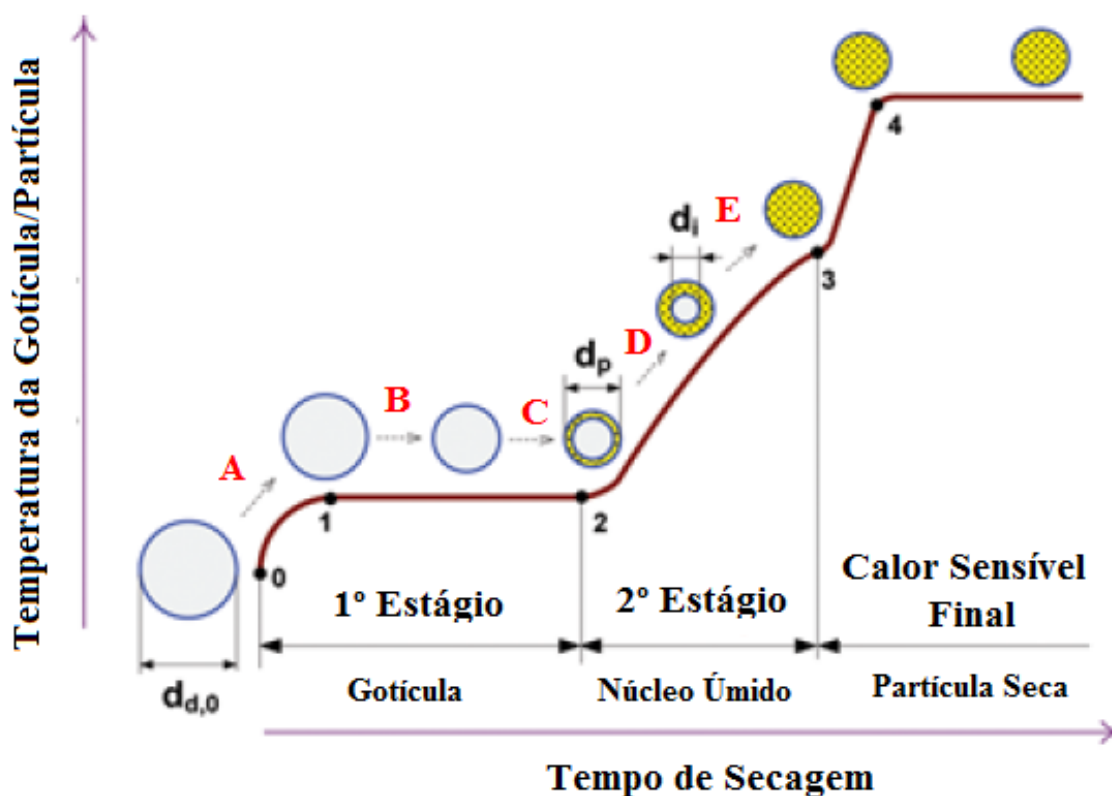
Fonte: Adaptado de Mujumdar (2014).

2.1.3 Cinética de Secagem

A cinética de secagem é o estudo do comportamento da retirada de umidade de um material, que leva em conta os mais variados métodos de secagem. Por meio dos gráficos de secagem são obtidos os perfis de perda de umidade, tornando é possível estabelecer equações que preveem o comportamento destes perfis no decorrer do tempo (ANANDHARAMAKRISHNAN; ISHWARYA, 2015).

De acordo com Dolinsky (2001) a perda de umidade da gotícula e a formação das partículas podem ser divididas em cinco etapas, apresentadas na Figura 3, e descritas na sequência.

Figura 3 - Estágios de secagem com a representação das gotículas/partículas durante o processo de secagem.



Fonte: Adaptado de Mezhericher; Levy; Borde (2012).

A) Na etapa de indução, ocorre o aquecimento da superfície das gotículas, aumento de sua temperatura inicial (T_0) até atingir um valor de equilíbrio (T_{eq}) e elevação da taxa de secagem (DOLINSKY, 2001);

B) A taxa de secagem e a temperatura da gotícula são praticamente constantes, devido ao excesso de líquido no exterior da gotícula, que envolve toda sua superfície. Nesta etapa não

há qualquer resistência à transferência de calor e massa durante a evaporação do líquido, ou seja, será semelhante à evaporação do líquido puro, como consequência da perda de umidade ocorrerá a redução do diâmetro das gotículas, até que o excesso de umidade seja quase todo evaporado na superfície da gota, que se transforma em uma partícula úmida, finalizando o período de secagem rápida (MEZHERICHER; LEVY; BORDE, 2012);

C) Inicia-se o período de secagem lenta e esta etapa está associada à formação de uma crosta porosa seca e um núcleo úmido interno. A temperatura da partícula úmida se eleva e a taxa de secagem reduz, pois a formação da crosta diminui significativamente a retirada de umidade da partícula. A difusão da umidade passa a ocorrer através de poros do interior do núcleo úmido até à superfície da partícula, a temperatura de equilíbrio das partículas se eleva. A partir desta etapa acredita-se que o diâmetro externo das partículas permaneça inalterado (DOLINSKY, 2001; MEZHERICHER; LEVY; BORDE, 2012);

D) Esta etapa se inicia quando se atinge a temperatura de ebulição da solução (água) no interior da partícula e geralmente termina com a remoção completa da umidade livre presente na partícula (DOLINSKY, 2001);

E) Etapa final de secagem, em que a temperatura da partícula aumenta drasticamente, até quase à temperatura do ar de secagem, ocorrendo a remoção da água ligada até que se atinja a umidade de equilíbrio do sólido, tornando a taxa de secagem próxima de zero e cessando a secagem (DOLINSKY, 2001).

Deve-se ressaltar que as etapas (B) e (C) são as mais críticas do processo de secagem, pois influenciarão diretamente na morfologia da partícula obtida pelo processo de secagem e na qualidade do produto final, por isso são as mais estudadas.

2.1.4 Separação do Produto

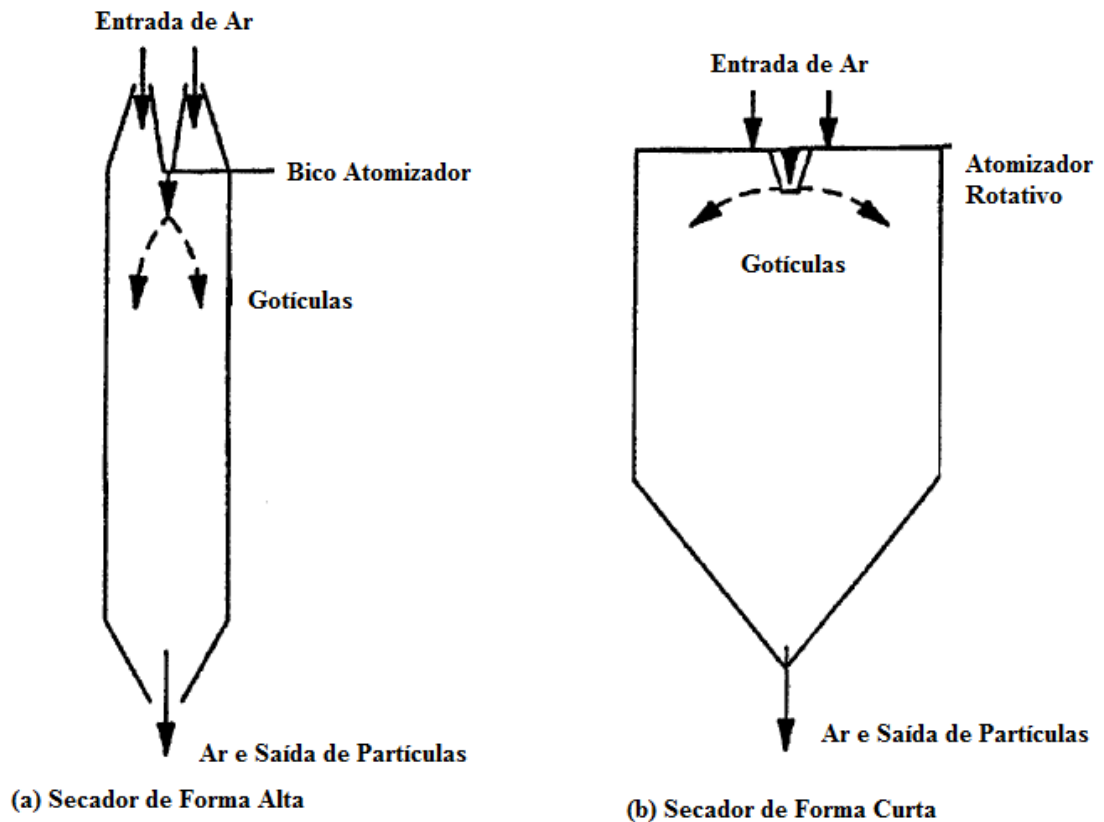
O produto seco geralmente é recolhido na base do equipamento e separado do ar de secagem por um ciclone, um transportador de parafuso ou um sistema pneumático acoplado a um ciclone. A seleção do equipamento dependerá das condições de operação e das características físicas do pó (KURIAKOSE; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2010).

2.2 Configurações de Spray Dryers

Há dois tipos básicos de *spray dryers*: de forma longa e de forma curta, conforme apresentado na Figura 4. Os desenhos de equipamentos de forma longa têm a relação de altura-diâmetro de 5:1, proporcionando uma zona de recirculação significativa dentro desses

secadores. Já os secadores de forma curta possuem relações altura-diâmetro de cerca de 2:1, levando a escoamentos mais complexos do que nos equipamentos de forma longa, pois muitos *spray dryers* de forma curta possuem zonas de recirculação em um grande intervalo de velocidades de escoamento de gás (LANGRISH; FLETCHER, 2001).

Figura 4 - Tipos de *Spray Dryers*: (a) Forma longa. (b) Forma curta.



Fonte: Adaptado de Langrish; Fletcher (2001).

3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

O interesse pelo estudo do movimento dos fluidos data-se de muitos anos atrás, mas no início da década de 1910 alguns cientistas realizaram vários estudos que resultaram em grandes avanços nesta área; no entanto, para descrever o comportamento do escoamento de fluidos de forma matemática eram necessárias muitas simplificações para se chegar a uma solução (KURIAKOSE; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2010; LIMA, 2005).

Em meados do século XX surgiram os computadores, que se tornaram uma boa alternativa para solução numérica de equações complexas, por meio da utilização de técnicas computacionais, possibilitando a obtenção de perfis de escoamento de um fluido em um determinado volume de controle. Com isto, surgiu uma nova linha de pesquisa de estudo de escoamento de fluidos, chamada Fluidodinâmica Computacional (LIMA, 2005). De acordo com Martín (2014), a técnica de CFD possui uma interação entre diversas disciplinas de engenharia, dentre elas temos: matemática, mecânica dos fluidos e ciência da computação. Desta forma, a fluidodinâmica computacional é definida como uma ferramenta numérica, que utiliza métodos numéricos para a resolução de equações físicas e de fenômenos de transporte (massa, movimento, energia e conservação de espécies) em computadores utilizando de linguagem de programação.

Esta ferramenta computacional é amplamente empregada nos mais variados problemas de engenharia (XIA; SUN, 2002). Dentre eles temos:

- Aplicações Industriais: Automotiva, Biomédica, Combustão, Eletrônicos e Computadores, Energia, Mecânica, Marinha, Metalúrgica, Nuclear, Petróleo, Química e Processos, Água (XIA; SUN, 2002);
- Aplicações Ambientais: Poluição Atmosférica, Cálculos climáticos, Fluxos oceânicos e Poluição de águas naturais (XIA; SUN, 2002).

Na indústria de alimentos, somente a partir dos anos 90 que os conceitos de dinâmica dos fluidos passaram a ter maior atenção por parte da comunidade científica e estudos mais aprofundados nesta área começaram a ser realizados, empregando-se a técnica de CFD. O crescente interesse pela técnica se explica porque muitos processos da indústria de alimentos envolvem transferência de calor e massa e, em alguns casos, podem ocorrer mudanças de fase e reações químicas; além disso, os equipamentos muitas vezes possuem geometrias complexas, o que exigiria cálculos matemáticos dispendiosos, constantemente simplificados para que se torne possível sua resolução (SIMPSON, 2009). Com o objetivo de tornar estes cálculos mais precisos, os computadores com alta capacidade de processamento aliados à

utilização de técnicas computacionais se tornaram ferramentas importantes para solução numérica de equações matemáticas complexas. Desta maneira, a técnica de CFD é uma poderosa ferramenta computacional, que pode ser usada para cálculo de problemas complexos em mecânica de fluidos e transferência de calor, podendo ser aplicada nas mais diversas áreas de processamento na indústria, tais como: refrigeração, esterilização, mistura, secagem, etc (LIMA, 2005; SIMPSON, 2009; XIA; SUN, 2002).

Augusto; Cristianini (2012) demonstram a eficiência do CFD no processo de esterilização ao simular o processamento térmico de alimentos líquidos em embalagens com geometria prismático-retangular. No estudo foi avaliada a influência da posição da embalagem na eficiência do processo de esterilização por meio de perfis térmicos e de velocidade do líquido no interior da embalagem. Os resultados obtidos demonstram que a técnica de CFD possui grande potencial de aplicação na área de processos térmicos de alimentos líquidos, especialmente para avaliar a eficiência de geometrias de embalagens novas ou não convencionais.

Ao aplicar a técnica de CFD ao processo de secagem por *spray dryer*, este se tornou uma ferramenta de grande importância, pois este tipo de secagem envolve escoamentos complexos e multifásicos, com uma mistura de gás, gotículas e partículas. Além disso, a taxa de secagem é fortemente influenciada pela velocidade do ar; por isso, é de grande importância conhecer os padrões de escoamento de ar e sua velocidade no interior da câmara de secagem; para que, por meio destes perfis seja possível encontrar intervalos de escoamentos de ar ideais para uma secagem mais eficiente. No entanto, estes parâmetros são difíceis de se medir de forma experimental, pois seriam necessários vários medidores (sensores) distribuídos em várias direções de fluxo de ar e locais. Além disso, existem algumas limitações na modelagem dos fenômenos complexos, especialmente os relacionados à turbulência do gás. Conhecer a trajetória das partículas (velocidade, temperatura, tempo de residência) no interior da câmara de secagem também é de extrema importância para a otimização da secagem, pois todos estes parâmetros, além da velocidade do ar de secagem, influenciarão diretamente na qualidade do produto obtido (KURIAKOSE; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2010; OAKLEY; BAHU, 1993).

De acordo com Oakley; Bahu (1993), os modelos de CFD baseados em dados teóricos são considerados um grande avanço em relação aos modelos de projeto tradicionais que eram baseados em dados empíricos. A fluidodinâmica computacional vem sendo utilizada com sucesso como uma ferramenta de simulação na previsão de parâmetros de secagem tais como fluxo do ar de secagem e trajetória das partículas no interior da câmara. Kieviet (1997) em

seus estudos desenvolveu um modelo empregando CFD, capaz de prever padrões de escoamento de ar, além da trajetória das partículas e seus tempos de residência no interior da câmara, simulando em 2D um *spray dryer* com fluxo de ar concorrente. O modelo computacional foi comparado com dados experimentais e concluiu-se que o modelo foi capaz de prever os parâmetros de secagem com boa precisão. Anandharamakrishnan et al. (2010) desenvolveram um modelo em 3D utilizando a técnica de CFD para um *spray dryer* de forma curta e os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais do trabalho de Kieviet (1997). As simulações obtidas tiveram uma boa concordância entre com os resultados experimentais para a previsão de velocidade e temperatura do ar. Os autores também constataram que o ângulo de pulverização maior proporcionou uma distribuição mais ampla de trajetórias de partículas dentro da câmara e isso levou a maiores taxas de transferência de calor e massa.

3.1 Modelos Multifásicos

Quando se deseja simular um escoamento que envolve fluxos de vários fluidos e em diferentes fases, estes devem ser representados por múltiplas equações, que são empregadas somente se os fluidos estiverem se misturando e, caso ocorra uma separação entre os fluidos, esta só pode ser prevista através da utilização de um modelo multifásico. Neste modelo, cada fluido possui um conjunto separado de propriedades físicas. Vale ressaltar que diferentes fluidos possuirão diferentes densidades e isso influenciará na magnitude das forças que podem atuar nos fluidos, possibilitando a predição da separação. Além disso, em modelos multifásicos, o volume de controle não pode ser ocupado por mais de uma fase por vez, levando ao emprego do conceito de fração volumétrica para cada fase. Na simulação de *spray dryers* os modelos mais usados são: a abordagem Euleriana-Euleriana para a fase contínua (que ocupa todo o volume de controle – ar de secagem) e a abordagem Euleriana-Lagrangiana para a fase dispersa (gotículas e partículas) (JOHNSON, 2016; PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

3.1.1 Abordagem Euleriana-Euleriana

A abordagem Euleriana geralmente é empregada em escoamentos que contenham a interação entre dois ou mais fluidos, podendo estes estarem na fase de gás, líquido ou sólido. Neste modelo diferentes conjuntos de equações de continuidade e momento são usados para descrever o escoamento de cada fluido. A influência no movimento que cada fluido possui um

sobre o outro é descrita utilizando termos de troca na equação do movimento. Quando há transferência de calor e massa entre as fases, também são usados os termos de troca nas equações de energia e continuidade. As frações de volume das fases são rastreadas, com a condição de que a soma das frações de volume para todas as fases seja igual a um em todos os momentos e em todos os volumes de controle (JOHNSON, 2016; PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

No modelo Euleriano cada fração de volume é considerada contínua no espaço e no tempo. Ou seja, cada fase (gás, líquido ou sólido) é tratada como contínua com seu conjunto de equações da continuidade e propriedades associadas. Este é o modelo mais complexo e geral para a simulação de fluxos multifásicos e requer recursos computacionais adicionais para resolver o grande conjunto de equações diferenciais parciais. Na secagem por *spray dryer* a abordagem Euleriana é usada para descrever a interação entre o ar de secagem e as gotículas de água (umidade presente no ar de secagem) (JOHNSON, 2016).

3.1.2 Abordagem Euleriana-Lagrangiana

A abordagem Euleriana-Lagrangiana é o modelo matemático mais adequado para descrever a trajetória de gotículas e partículas no interior de um volume de controle (JOHNSON, 2016). No modelo Lagrangiano as equações de conservação de movimento e continuidade são solucionadas para determinar a trajetória de cada partícula. Quando a partícula passa através de um elemento de malha arbitrário, a energia, a massa e o momento transferidos para a fase contínua são calculados e adicionados aos termos de origem desse elemento, sendo assim, a trajetória de cada partícula será calculada (SIMPSON, 2009).

Este método calcula o tempo de residência de uma partícula dividindo-o em pequenos espaços de tempo, e após cada iteração obtém-se uma nova posição e novas propriedades físicas para a gotícula ou partícula. Para a simulação da população total de gotículas e partículas, estas serão representadas por um número finito de parcelas computacionais, em que cada uma representará um grupo de partículas com as mesmas propriedades. Cada parcela tem suas próprias propriedades iniciais, como ponto de injeção, velocidade, diâmetro, densidade e temperatura. Vale ressaltar que o número de parcelas deve ser grande o suficiente para representar as propriedades da população total (SUN, 2007).

Pode-se observar que empregando do modelo Lagrangiano é possível obter a interpretação física da interação entre partícula-fluido, partícula-partícula e partícula-parede e isso permite a identificação de regiões de recirculação de gotículas ou de choque com a

parede do volume de controle; no entanto, a convergência da simulação pode se tornar muito demorada, dependendo do número de partículas adicionadas ao sistema. Isso implica que a utilização da abordagem Lagrangiana-Euleriana ainda está limitada a cálculos em pequena escala (SIMPSON, 2009; SUN, 2007).

3.2 *Princípios da Conservação*

A modelagem do escoamento de fluidos é feita por meio de modelos físicos, que envolvem a resolução de equações de conservação de massa, movimento, energia e espécies, pois são as principais equações diferenciais necessárias para a formulação de problemas de fluidodinâmica. Este conjunto de equações baseia-se nos princípios de conservação, além disso, as derivações são feitas aplicando estes princípios a um volume de controle através das condições de contorno, onde um fluido estará escoando (JOHNSON, 2016).

Em escoamentos de fluidos multifásicos primeiramente simula-se a fase contínua que é constituída de ar de secagem e após sua convergência é feita a simulação da fase dispersa que são as gotículas/partículas, para o caso de *spray dryers*.

3.2.1 *Equação da Continuidade*

A equação de continuidade é uma equação de conservação de massa de um fluido escoando em um volume de controle. Para garantir a conservação da massa em um volume de controle, deve-se respeitar a lei de conservação de massa que afirma que a massa não pode ser criada nem destruída, além disso, a massa que escoar através de todas as superfícies do volume deve ser igual à taxa de acúmulo (SABLANI; DATTA; RAHMAN; MUJUMDAR, 2006; MARTÍN, 2014). A Equação 1 foi obtida a partir do delineamento da equação de Mezhericher; Levy; Borde (2012) em seu trabalho para simulação de *spray dryer*.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = S_c \quad (1)$$

3.2.2 *Equação do Movimento*

A conservação de movimento de um fluido em um volume de controle é descrita pela segunda lei de Newton, a qual afirma que a taxa de mudança do momento de um fluido é igual à soma das forças que atuam sobre o fluido (SABLANI, DATTA, RAHMAN,

MUJUMDAR, 2006). A Equação 2 foi obtida a partir dos estudos de Mezhericher; Levy; Borde (2012).

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \right] + \Delta \rho g_i + U_{pi} S_c + \Sigma F_{gp} \quad (2)$$

3.2.3 Equação da Energia

Para a conservação da energia em um volume de controle, deve-se assumir que a energia interna específica é dada em função da densidade e temperatura. As energias cinética e interna dentro do volume de controle aumentam com o tempo por meio da adição líquida desses dois tipos de energia em toda a superfície, devido à condução de calor através da superfície, por intermédio do trabalho feito na superfície pelo fluido enquanto se move através da superfície, e por causa do trabalho feito contra forças externas (JOHNSON, 2016). A Equação 3 foi obtida a partir dos estudos de Mezhericher; Levy; Borde (2012).

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\rho u_j h)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_h \quad (3)$$

3.2.4 Equação de Conservação das Espécies

A equação de conservação das espécies é a aplicação da lei da conservação da massa a cada espécie presente na mistura que se deseja simular, uma vez que as fases, muitas vezes, não consistem em fluidos puros com apenas uma espécie, mas de muitas espécies formando uma mistura multicomponente. A equação de conservação de espécies pode ser usada para uma mistura de múltiplas espécies representando fluidos em uma mistura com diferentes propriedades físicas. A solução da equação de conservação de espécies pode prever como diferentes fluidos se misturam, no entanto, não pode prever como eles podem se separar, pois para modelar a separação, são necessárias equações de movimento para cada um dos fluidos para que as forças do corpo possam atuar nos fluidos de forma independente (abordadas na seção 3.1). O transporte de espécies é, no entanto, uma ferramenta muito útil para prever tempos de mistura ou reação química (MARTÍN, 2014; PAUL; ATIEMO-OBENG;

KRESTA, 2004). A Equação 4 foi obtida a partir dos estudos de Mezhericher; Levy; Borde (2012).

$$\frac{\partial(\rho Y_V)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_V) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_y} \frac{\partial Y_V}{\partial x_j} \right) + S_c \quad (4)$$

3.2.5 Trajetória das Partículas

Na secagem por *spray dryer*, o escoamento no interior do equipamento é constituído por uma fase gasosa contínua que geralmente é o ar de secagem e uma fase dispersa na forma de gotículas/partículas (fase líquida e sólida). Muitos estudos comprovaram que o movimento das partículas é diretamente influenciado pelo escoamento da fase gasosa e vice-versa devido à influência na transferência de calor e massa entre fases. A intensidade das interações entre as fases dependerá do tamanho, da densidade e quantidade de partículas dispersas no interior do equipamento. Como discutido anteriormente as partículas podem ter sua trajetória rastreada por meio da resolução de equações de conservação; além disso, a abordagem mais usada para descrever a trajetória das partículas através da fase contínua é o método Euleriano-Lagrangiano que foi discutido na seção 3.1.2 (SUN, 2007).

De forma geral, a fase contínua e a fase dispersa são calculadas separadamente, em que as fases contínua e dispersa são alternadamente executadas em um ciclo de cálculo (método iterativo) até sua convergência. O resolvidor da fase contínua calcula suas propriedades físicas, como temperatura, umidade, velocidade e grau de turbulência, em cada célula de volume de controle, e o resolvidor da fase dispersa interpreta e utiliza estes dados para calcular a trajetória das partículas. Quando as partículas passam por uma célula computacional, certas quantidades de energia, massa e movimento são transferidas para a fase contínua que são novamente calculadas e adicionadas aos termos de origem dessa célula. Desta forma, todas as trajetórias são calculadas uma a uma. Na próxima iteração, o resolvidor da fase contínua usa esses termos de origem para um novo cálculo e este ciclo é repetido até alcançar a convergência (SUN, 2007).

3.3 Transferência de Calor

De maneira geral há basicamente três modos de transferir calor: condução, convecção e radiação; no caso de secagem por *spray dryer* a radiação será negligenciada. A modelagem

da transferência de calor pode ser de forma estacionária ou transiente; para problemas no estado estacionário há apenas variações com relação à localização, enquanto os problemas em estado transiente também variam com o tempo (PASTORINO, 2016).

3.4 Modelos de Turbulência

Utilizando somente os modelos físicos tradicionais, é praticamente impossível descrever com precisão o fluxo turbulento. Entretanto, nas últimas décadas pesquisadores desenvolveram diferentes modelos de turbulência, que são suficientemente precisos na previsão dos fluxos turbulentos obtidos em ensaios experimentais (MARTÍN, 2014).

A diferença entre regimes de escoamentos se dá basicamente pelo número adimensional de Reynolds, que é a relação entre forças inerciais e forças viscosas (MARTÍN, 2014), conforme a Equação 5:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (5)$$

Para baixos números de Reynolds, as forças inerciais serão muito pequenas em relação às forças viscosas e o regime de escoamentos será laminar; já para altos números de Reynolds, a influência das forças viscosas no escoamento é pequena e perturba o escoamento, tornando-o turbulento. Além disso, na mudança de um regime de fluxo laminar para o escoamento turbulento ou vice-versa, há o regime de escoamento intermediário chamado regime de escoamento de transição (MARTÍN, 2014).

Hinze (1987) define o escoamento turbulento de um fluido como “uma condição irregular de escoamento em que as várias quantidades mostram uma variação aleatória com coordenadas de tempo e espaço para que os valores médios estatisticamente distintos possam ser discernidos”. Ou seja, os fluxos turbulentos são caracterizados por instabilidades e flutuações instantâneas de velocidade, temperatura e pressão. O fenômeno da turbulência é muito complexo, por isso não pode ser descrito utilizando apenas as equações de Navier-Stokes com aplicação de métodos numéricos.

Os softwares computacionais não conseguiam modelar os escoamentos turbulentos com muita precisão; para contornar este problema, simulações de regimes turbulentos são feitas empregando modelos de turbulência por meio de um processo de média. Equações médias de Navier-Stokes, conhecidas como RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*),

representam as grandezas médias do escoamento, com todas as escalas de turbulência sendo modeladas. O termo RANS foi concebido, originalmente, para escoamentos estacionários. Por questão de estabilidade numérica o operador média foi aplicado às equações de Navier-Stokes na sua forma transiente, sendo assim denominadas URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Este tipo de aproximação reduz o esforço computacional sendo aplicado tanto para escoamentos transientes como permanentes (SILVA, 2012). Tais equações podem ser a média do tempo (turbulência estacionária), a média espacial (turbulência homogênea) ou a média do conjunto. Na maioria dos problemas, a turbulência não é homogênea, sendo a média do tempo a mais usada (FARID; SUN, 2010).

A utilização das equações RANS produz mais graus de liberdade nas equações, sendo assim, a modelagem ainda não está completa, pois ainda não é possível modelar as tensões de Reynolds para resolver o problema. Desta forma, os modelos de turbulência são conhecidos como solução do problema de fechamento de turbulência (FARID; SUN, 2010; MARTÍN, 2014). As quatro classes comuns de modelos de turbulência são:

1. Modelos algébricos (equação zero);
2. Modelos de uma equação;
3. Modelos de duas equações;
4. Modelo dos tensores de Reynolds (RSM).

Os modelos mais usados para descrever o escoamento turbulento durante a secagem com *spray dryer* são os modelos de duas equações e o dos tensores de Reynolds (RSM).

3.4.1 Modelos de Duas Equações

3.4.1.1 Modelo k - ε Padrão

No modelo k - ε são empregadas duas equações de transporte adicionais, que devem ser resolvidas para calcular os tensores de Reynolds. É um dos modelos mais robustos, o que o torna “computacionalmente estável”, mesmo que ocorram outras flutuações físicas mais complexas, por este motivo pode ser aplicado aos mais variados tipos de escoamentos turbulentos. É um modelo semiempírico, ou seja, foi desenvolvido com base nas observações dos escoamentos com elevados números de Reynolds. As Equações 6 e 7, descrevem o modelo para a energia cinética da turbulência k e a taxa de dissipação da turbulência ε , respectivamente (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k + C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

As constantes $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ são constantes empíricas e G_k é um termo de geração de turbulência, que contém produtos de gradientes de velocidade e também depende da viscosidade turbulenta, conforme apresentado na Equação 8 (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004):

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

Outros termos podem ser adicionados às Equações 6 e 7 para incluir outros efeitos físicos, como movimento em espiral, flutuabilidade ou compressibilidade, por exemplo. A viscosidade turbulenta é derivada de k e ε e envolve uma constante extraída de dados experimentais, C_μ (Equação 9) que tem um valor de 0,09 (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

No processo de solução para o modelo k - ε padrão, as equações de transporte são solucionadas para k e ε , cujos valores são utilizados para calcular a viscosidade turbulenta, μ_t . Usando os resultados para μ_t e k , os tensores de Reynolds podem ser calculados a partir da hipótese de Boussinesq¹ para substituição nas equações movimento. Uma vez que as equações do movimento são solucionadas, os novos componentes de velocidade são usados para atualizar o termo de geração de turbulência, G_k , e o processo é iterativo, até se obter a convergência (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

O modelo k - ε padrão descreve mecanismos que afetam a energia cinética de turbulência. No *spray dryer* o fluxo de escoamento de gás é turbulento, pois há uma vazão de

¹ Normalmente a hipótese de Boussinesq é empregada para relacionar os tensores de Reynolds com a média dos gradientes de velocidade do escoamento (HINZE, 1987).

gás a altas velocidades. Assume-se que a turbulência é isotrópica (a mesma em todas as direções), esta suposição reduz o esforço computacional necessário para a simulação. É por isso que o modelo $k-\varepsilon$ padrão é um dos modelos de turbulência mais empregados atualmente, para simulação de regimes turbulentos. O modelo $k-\varepsilon$ é adequado para a maioria das simulações de *spray dryer*, pois a turbulência no escoamento de ar não é forte o suficiente para reduzir a precisão do modelo (FARID; SUN, 2010; SUN, 2007).

3.4.1.2 Modelo RNG $k-\varepsilon$

O modelo de grupo de renormalização (RNG) foi desenvolvido como uma alternativa ao modelo $k-\varepsilon$ padrão que é semiempírico. O modelo é derivado de métodos estatísticos utilizados no campo da teoria de RNG, que é semelhante ao modelo $k-\varepsilon$ padrão, mas contém modificações na equação de dissipação para melhor descrever os fluxos com regiões de alta tensão (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

3.4.1.3 Modelo $k-\varepsilon$ Realizável

O modelo $k-\varepsilon$ realizável é uma adição bastante recente à família de modelos de duas equações. Ele difere dos modelos $k-\varepsilon$ devido ao fato de que a viscosidade turbulenta é calculada de maneira diferente, por meio da utilização da variável C_μ , que é uma função da taxa de deformação local e da rotação do fluido, empregada para evitar que os valores não físicos das tensões normais sejam considerados. Além disso, a modificação do cálculo de ε e μ_t , torna este modelo de turbulência superior aos outros modelos $k-\varepsilon$ para uma série de aplicações (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

3.4.2 Modelo dos Tensores de Reynolds (RSM)

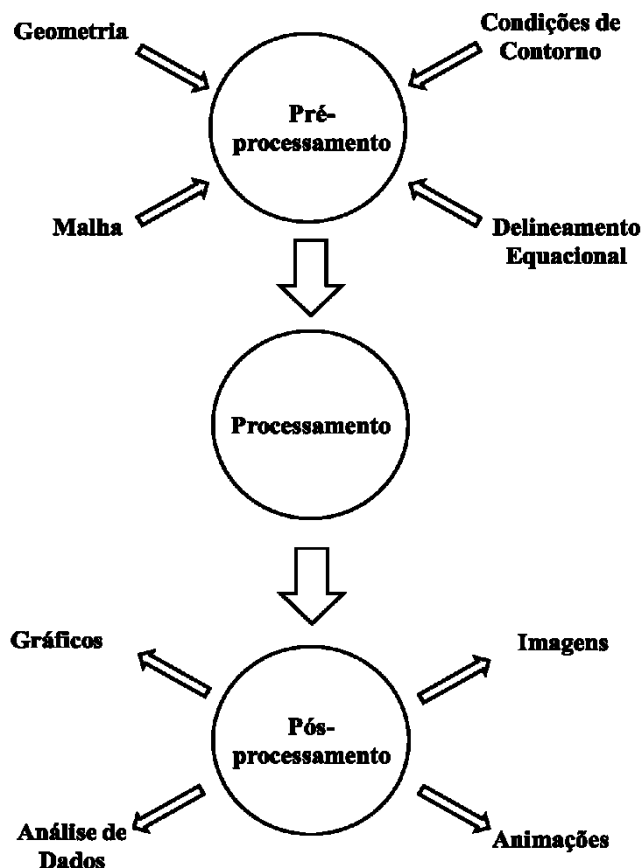
O modelo RSM não considera que a viscosidade turbulenta é isotrópica, como é feito para os modelos $k-\varepsilon$, mas calcula os tensores individualmente. Para modelos 2D, isso equivale a quatro equações de transporte adicionais e nos modelos 3D, são necessárias seis equações de transporte adicionais. O efeito total da turbulência pode ser representado nas equações de movimento com maior precisão do que pode ser obtida a partir dos modelos $k-\varepsilon$. Os fluxos para os quais a suposição de viscosidade turbulenta isotrópica não deve ser aplicada são os que incluem movimento em espirais em altas velocidades, mudanças rápidas na taxa de

deformação ou curvatura de racionalização substancial (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

4 METODOLOGIA

A simulação de um escoamento utilizando a técnica de CFD é realizada em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento, que são representadas na Figura 5 (SUN, 2007). Tais etapas serão detalhadas na sequência.

Figura 5 - Fluxograma das etapas para simulação em CFD.



Fonte: Adaptado de Sun (2007).

4.1 *Pré-processamento*

O pré-processamento é a principal etapa do processo, pois nesta etapa será definida a geometria e a malha utilizadas na simulação e estes dois parâmetros do processo afetarão diretamente os resultados obtidos no fim da simulação. Para que seja possível realizar a simulação, primeiramente é necessário conhecer toda a física envolvida no escoamento. Desta forma, o usuário será capaz determinar os processos físicos que podem ser representados com precisão em um modelo CFD e utilizar as ferramentas matemáticas mais adequadas para determinar as variáveis desejadas (SUN, 2007).

A geometria é definida escolhendo uma estrutura pré-descrita, geralmente obtida na literatura, que é importada de qualquer programa de CAD padrão. Já a malha pode ser feita de forma automática orientada a objetos que permitam que a malha seja definida em torno da geometria modelada. Após esta etapa é necessário definir as propriedades do fluido, os modelos físicos e as condições de contorno do modelo (SUN, 2007).

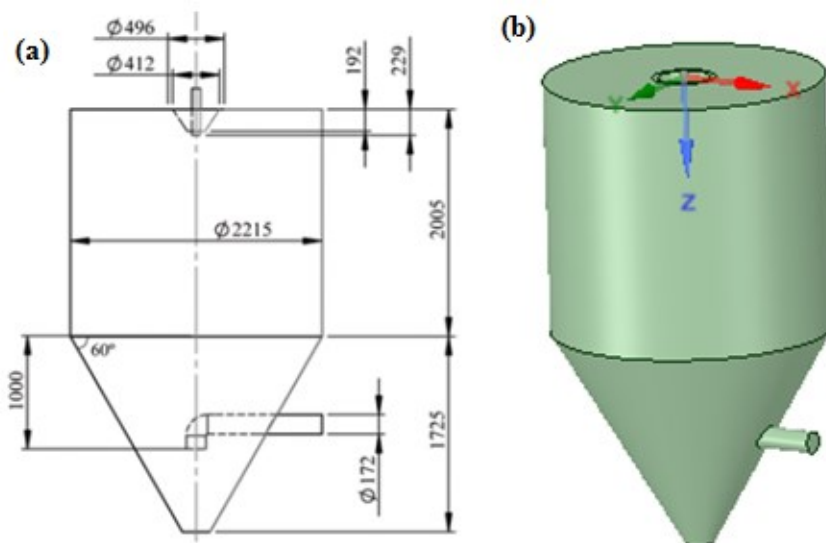
4.1.1 Simulação de um Trabalho da Literatura

Com o objetivo de compreender melhor como é feita a modelagem em CFD do *spray dryer*, o trabalho da literatura intitulado “*Three-Dimensional Spray-Drying Model Based on Comprehensive Formulation of Drying Kinetics*”, de Mezhericher; Levy; Borde (2012) foi escolhido, e a partir dos dados fornecidos houve uma tentativa de simulação.

4.1.1.1 Geometria

Mezhericher; Levy; Borde (2012) utilizaram uma geometria de *spray dryer* com a parte superior cilíndrica e a parte inferior cônica e um tubo de saída de ar na sessão cônica. Na Figura 6 é apresentado o *spray dryer* utilizado no estudo (Figura 6a); além disso, os valores das dimensões adotadas estão em milímetros e foram obtidas a partir de trabalhos na literatura dos seguintes autores: Huang; Kumar; Mujumdar (2003); Kieviet (1997). O software usado para gerar a geometria (Figura 6b) foi o SpaceClaim versão 18.2 Academic Student.

Figura 6 - Geometria da câmara secagem do *Spray Dryer*.

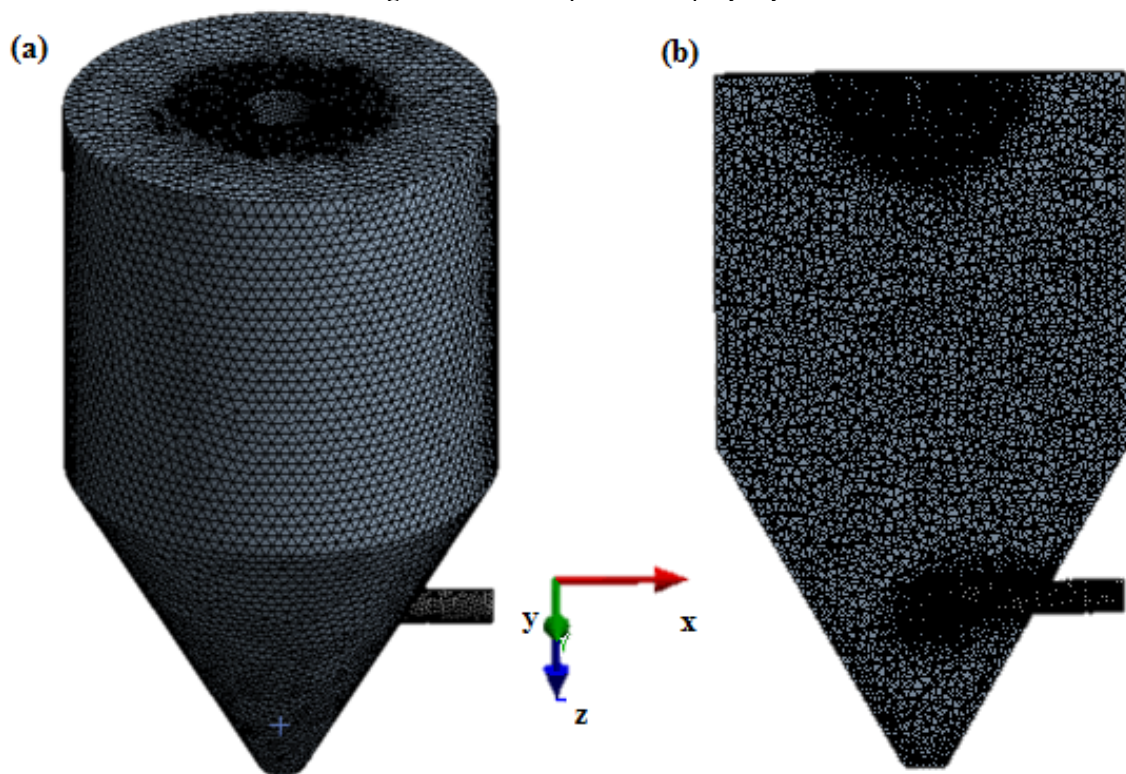


Fonte: (a) Mezhericher; Levy; Borde (2012); (b) Próprio Autor.

4.1.1.2 Malha

Na geometria da Figura 6 foi feita uma malha composta por 488.044 elementos de célula de forma tetraédrica. Um refinamento foi feito nas regiões onde ocorre a injeção e dispersão das gotículas da fase dispersa, pois é uma região onde se espera a ocorrência de grandes gradientes de transferência de calor, massa e movimento. A malha utilizada na simulação é apresentada na Figura 7a, na Figura 7b foi feito um corte transversal para melhor visualização da malha no interior. O software usado para aplicação da malha foi o ANSYS Meshing versão 18.2 Academic Student.

Figura 7 - Malha aplicada ao *spray dryer*.



Fonte: Próprio Autor.

Vale ressaltar que a qualidade da malha utilizada na simulação é um ponto crítico, uma vez que, com uma malha de qualidade, obtêm-se resultados mais precisos e uma convergência mais rápida. A seguir apresentam-se parâmetros de avaliação de qualidade da malha.

- **Qualidade da Malha:** fornece uma medida de qualidade da malha que varia entre 0 e 1. Esta medida é baseada na proporção do volume para a soma do quadrado dos comprimentos de borda para elementos quadrangulares/triangulares 2D ou a raiz quadrada do cubo da soma do quadrado dos comprimentos de borda para elementos 3D. Um valor de 1 indica um cubo ou um quadrado perfeito, enquanto um valor de 0 indica que o elemento tem um volume zero ou negativo (FLUENT Inc, 2009).
- **Relação de Aspecto:** é a medida do alongamento de uma célula, que é calculado a partir da relação entre o valor máximo e o valor mínimo das distâncias normais entre o centroide da célula e os centroides da face (calculados como o produto do ponto do vetor da distância e a face normal) e as distâncias entre o centroide da célula e os nós (FLUENT Inc, 2009).
- **Relação Jacobiana:** compara a medida de um elemento com um elemento ideal. Se o elemento mapeado não tiver uma relação jacobiana próxima do elemento ideal, pode tornar os cálculos pouco confiáveis. A forma ideal de um elemento depende do tipo do mesmo (FLUENT Inc, 2009).
- **Ângulo de Canto Máximo:** é o ângulo máximo que as células podem possuir, de acordo com alguns estudos ângulo maiores que 180° reduzem o desempenho da malha (FLUENT Inc, 2009).
- **Assimetria:** é uma das principais medidas de qualidade para uma malha, pois determina o quão perto do ideal (isto é, equilátero ou equiangular), uma face ou célula está, varia entre 0 e 1, quanto mais próximo de 0 maior é a simetria (FLUENT Inc, 2009).
- **Qualidade Ortogonal:** é calculada usando o vetor normal para cada face. O vetor sai do centro da célula para o centro de cada uma das células adjacentes. A qualidade ortogonal varia de 0 a 1, em que valores próximos de 0 indicam pouca qualidade e valores próximos de 1 indicam ótima qualidade (FLUENT Inc, 2009).

Isto posto, a qualidade da malha gerada neste trabalho é apresentada na Tabela 1, por meio da qual, pode-se afirmar que neste trabalho foi possível gerar uma malha de boa qualidade, pois todos os valores obtidos para cada parâmetro de qualidade estão dentro dos intervalos especificados para se gerar um malha de qualidade.

Tabela 1 - Qualidade da malha.

Parâmetro de qualidade	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Qualidade do Elemento	0,22577	1	0,84823	0,09349
Relação de Aspecto	1,1576	9,3483	1,8057	0,44995
Relação Jacobiana	1	1	1	0
Ângulo de Canto Máximo	70,538°	158,43°	94,964°	11,995°
Assimetria	$1,2224 \times 10^{-7}$	0,84588	0,21041	0,11557
Qualidade Ortogonal	0,15412	0,99956	0,78823	0,11386

Fonte: Próprio Autor.

4.1.1.3 Condições de Contorno

Para a simulação da secagem, Mezhericher; Levy; Borde (2012) forneceram as condições de contorno que são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições de contorno para a simulação de secagem por *spray dryer*.

Parâmetros da Simulação		
Fase Contínua		
Velocidade do Ar	9,08	m s^{-1}
Temperatura do Ar	468	K
Umidade do Ar	0,009	$\text{Kg}_{\text{água}} \text{Kg}_{\text{ar}}^{-1}$
Modelo de Turbulência		
k	0,027	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
ε	0,37	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
Fase Dispersa		
Tipo do Atomizador	Pressão	
Ângulo de Atomização	76	Graus (°)
Velocidade das Gotículas	59	m s^{-1}
Temperatura das Gotículas	300	K
Fluxo de Atomização	0,0139	Kg s^{-1}
Diâmetro Médio das Gotículas	70,5	μm

Fonte: Mezhericher; Levy; Borde (2012).

4.2 Processamento

Na etapa de processamento é feita a resolução iterativa do modelo aplicando as condições de contorno especificadas e equações físicas escolhidas anteriormente, no volume de controle (geometria). O resolvidor numérico selecionado (FLUENT® 18.2 Academic Student) organiza as especificações feitas na etapa anterior em matrizes numéricas e as resolve utilizando o método iterativo. Este método é comumente usado para resolver um

conjunto completo de equações discretizadas para que elas possam ser aplicadas a uma única variável dependente. A resolução termina após a convergência das equações (SUN, 2007; XIA; SUN, 2002).

4.3 Pós-processamento

Na terceira etapa é possível visualizar e analisar os perfis de escoamento obtidos a partir da simulação, através de imagens, gráficos e animações que mostram os perfis de temperatura, velocidade, pressão no escoamento, e todas estas informações contribuem na interpretação dos resultados (SUN, 2007; XIA; SUN, 2002).

Como já mencionado, o software usado para realizar as etapas de processamento e pós-processamento foi o FLUENT[®] versão 18.2 Academic Student.

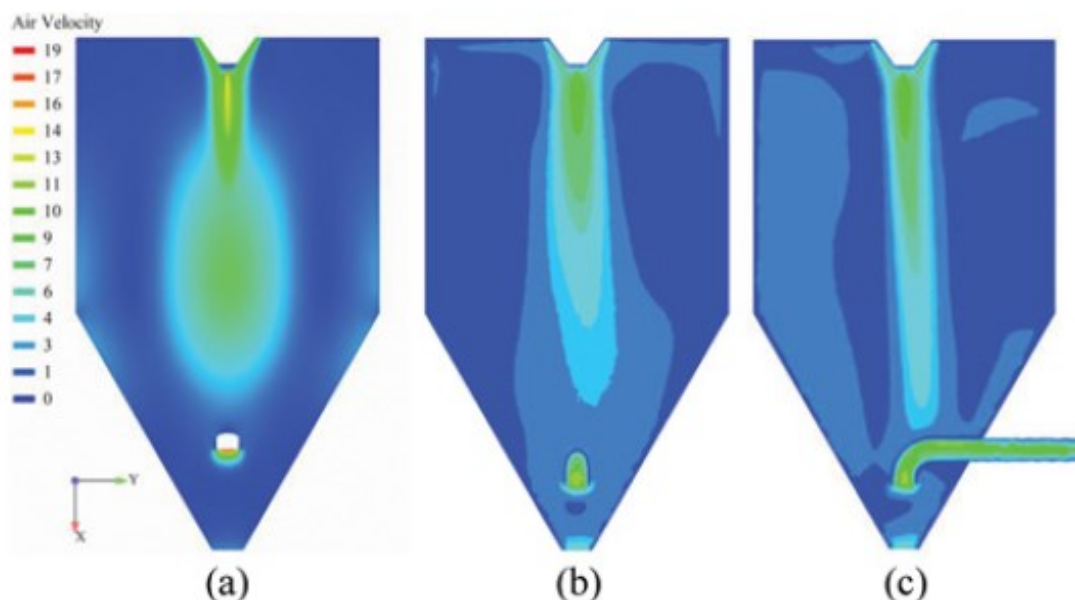
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Simulação com base no trabalho de Mezhericher; Levy; Borde (2012)

A partir dos dados fornecidos pelo trabalho de Mezhericher; Levy; Borde (2012), foi realizada uma simulação para a fase contínua, considerando que esta era composta somente por ar. No entanto, ao comparar os resultados dos autores (Figura 8) com aqueles obtidos no presente trabalho (Figura 9), pôde-se observar que os perfis de velocidade na fase contínua tiveram a mesma ordem de grandeza (máximo em torno de 19 m s^{-1}), mas não foram alcançados altos valores de velocidade na região central da parte cilíndrica, como ocorrido no estudo de Mezhericher; Levy; Borde (2012).

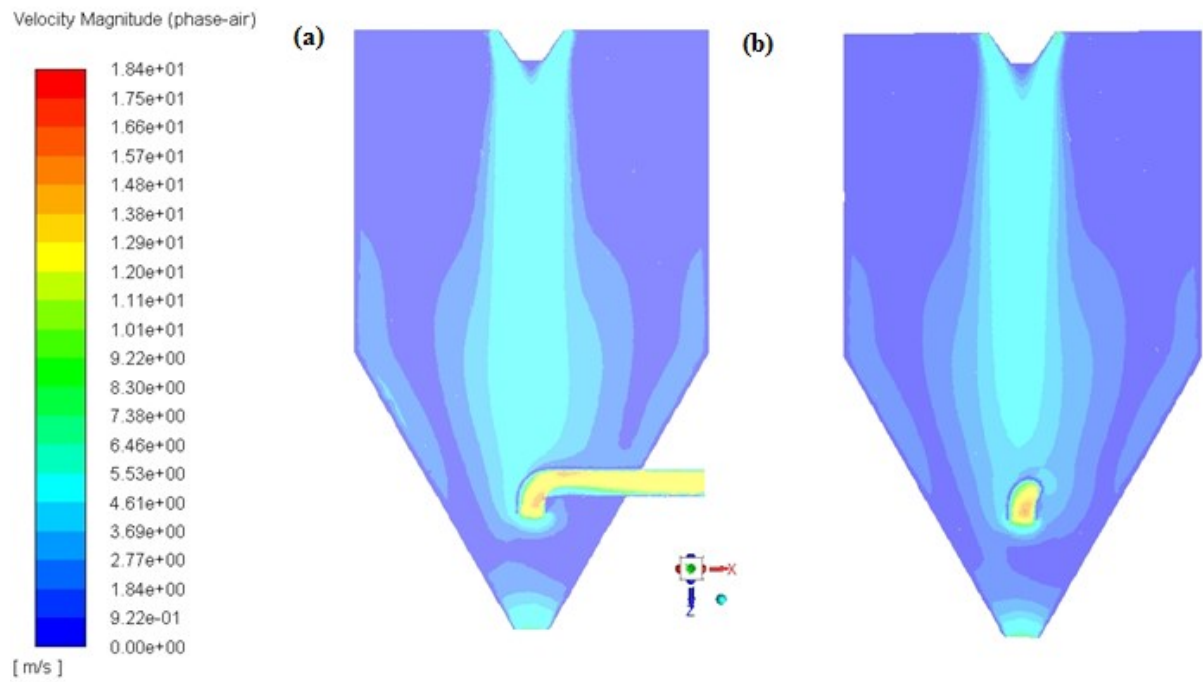
Há duas hipóteses que podem explicar o que pode ter ocorrido. A primeira é que o estudo não apresenta todos os parâmetros necessários para se realizar a simulação e tentar reproduzi-lo. Em segundo lugar, acredita-se ser ainda necessário um maior conhecimento sobre as condições físicas que envolvem o processo de secagem e mais estudos para se ter certeza se as informações foram inseridas corretamente no resolvidor numérico.

Figura 8 - Perfis de velocidade para a fase contínua, (a) simulação em 2D assimétrica, (b) vista frontal e (c) vista lateral de uma simulação em 3D.



Fonte: Mezhericher; Levy; Borde (2012).

Figura 9 – (a) Vista lateral e (b) vista frontal de perfis de velocidade para a fase contínua.



Fonte: Próprio Autor.

6 CONCLUSÃO

Por meio do estudo de vários trabalhos da literatura, pode-se afirmar que o CFD é uma importante ferramenta de modelagem para diversos processos na indústria de alimentos, inclusive para a secagem por *spray dryer*.

Ao longo dos anos, devido aos vários avanços na área da computação e da modelagem matemática, foi possível criar softwares cada vez mais robustos e precisos para simulação de escoamentos turbulentos, e isso só foi possível por meio da criação de novos modelos matemáticos, como os modelos de turbulência, modelos capazes de rastrear a trajetória das partículas e a interação entre fase contínua e dispersa.

No entanto, não foi possível reproduzir os resultados obtidos dos perfis de escoamento dos fluidos no interior da câmara de secagem de um *spray dryer* de um trabalho da literatura. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que, primeiramente o trabalho escolhido pode não apresentar todos os parâmetros necessários para se realizar a simulação, para que assim seja possível reproduzi-lo. Por outro lado, acredita-se que ainda sejam necessários mais estudos, para se ter um maior conhecimento sobre as condições físicas (muito complexas) que envolvem o processo de secagem e também para uma melhor compreensão do resolvidor numérico empregado para se ter certeza se as informações foram inseridas corretamente.

REFERÊNCIAS

- ANANDHARAMAKRISHNAN, C.; GIMBUN, J.; STAPLEY, A. G. F.; RIELLY, C. D. A Study of Particle Histories during Spray Drying Using Computational Fluid Dynamic Simulations. **Drying Technology**, v. 28, n. 5, p. 566–576, 2010. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373931003787918>>.
- ANANAHARAMAKRISHNAN, C.; ISHWARYA, P. S. **Spray drying techniques for food ingredient encapsulation**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2015. 312 p.
- ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, 2009. Fluent Inc.
- ASTERIADOU, K.; HASTING, A. P. M.; BIRD, M. R.; MELROSE, J. Computational Fluid Dynamics for the Prediction of Temperature Profiles and Hygienic Design in the Food Industry. **Food and Bioproducts Processing**, v. 84, n. 2, p. 157–163, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308506705302>>.
- AUGUSTO, P. E. D.; CRISTIANINI, M. Computational fluid dynamics evaluation of liquid food thermal process in a brick shaped package. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 32, n. 1, p. 134–141, 2012.
- CHHANWAL, N.; ANISHAPARVIN, A.; INDRANI, D.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of an electrical heating oven for bread-baking process. **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 3, p. 452–460, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.030>>.
- DELELE, M. A.; SCHENK, A.; TIJSKENS, E.; RAMON, H.; NICOLAÏ, B. M.; VERBOVEN, P. Optimization of the humidification of cold stores by pressurized water atomizers based on a multiscale CFD model. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 2, p. 228–239, 2009.
- DOLINSKY, A. A. HIGH-TEMPERATURE SPRAY DRYING. **Drying Technology**, v. 19, n. 5, p. 785–806, 2001. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-100103770>>.
- FARID, M. M. **Mathematical Modeling of Food Processing**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia de processamento de alimentos: princípios e práticas**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602 p.
- FILKOVA, I.; HUANG, L. X.; MUJUMDAR, A. S. Industrial Spray Drying System. **Handbook of industrial drying**, p. 191–226, 2015.
- FLETCHER, D. F.; GUO, B.; HARVIE, D. J. E.; LANGRISH, T. A. G.; NIJDAM, J. J.; WILLIAMS, J. What is important in the simulation of spray dryer performance and how do current CFD models perform? **Applied Mathematical Modelling**, v. 30, n. 11, p. 1281–1292, 2006.
- HARVIE, D. J. E.; LANGRISH, T. A. G.; FLETCHER, D. F. A computational fluid dynamics study of a tall-form spray dryer. **Food and Bioproducts Processing: Transactions**

of the **Institution of Chemical Engineers, Part C**, v. 80, n. 3, p. 163–175, 2002.

HINZE, J. O. **Turbulence**. 2nd Edition. New York: McGraw-Hill, 1987. 790 p.

HUANG, L.; KUMAR, K.; MUJUMDAR, A. S. A parametric study of the gas flow patterns and drying performance of co-current spray dryer: Results of a computational fluid dynamics study. **Drying Technology**, v. 21, n. 6, 2003.

JOHNSON, R. W. **The Handbook of Fluid Dynamics**. Boca Raton, Florida: CRC Press; 1998.

KESHANI, S.; DAUD, W. R. W.; NOUROUZI, M. M.; NAMVAR, F.; GHASEMI, M. **Spray drying: An overview on wall deposition, process and modeling** **Journal of Food Engineering**, 2015.

KIEVIET, F. G. **Modelling Quality in Spray Drying**. 1997. 100 f. Tese (Ph.D.), Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 1997.

KURIAKOSE, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, n. 8, p. 383–398, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.009>>.

LANGRISH, T. A. G.; FLETCHER, D. F. Spray drying of food ingredients and applications of CFD in spray drying. **Chemical Engineering and Processing**, v. 40, n. 4, p. 345–354, 2001.

LIMA, R. C. **Simulação de grandes escalas de escoamentos incompressíveis com transferência de calor e massa por um método de elementos finitos de subdomínio**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MARTÍN, M. M. **Introduction to Software for Chemical Engineers**. Boca Raton, Florida: CRC Press/Taylor & Francis. 2014.

MEZHERICHER, M.; LEVY, A.; BORDE, I. Three-Dimensional Spray-Drying Model Based on Comprehensive Formulation of Drying Kinetics. **Drying Technology**, v. 30, n. 11–12, p. 1256–1273, 2012. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2012.686136>>.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3rd Ed. Boca Raton, FL: CRC Press. 2006. 1312 p.

OAKLEY, D. E. Produce uniform particles by spray drying. **Chemical Engineering Progress**, v. 93, n. 10, p. 48–54, 1997.

OAKLEY, D. E.; BAHU, R. E. Computational modelling of spray dryers. **Computers and Chemical Engineering**, v. 17, n. Suppl, p. 493–498, 1993.

PASTORINO, S. **CdL in Energy and Aeronautical Engineering Modeling of Spray Drying using Computational Fluid Dynamics with an Open-Source software**. 2016. [s.l: s.n.] 2016.

PAUL, E. L.; ATIEMO-OBENG, V. A; KRESTA, S. M. **Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice**. New Jersey: John Wiley & Sons. 2004.

ROSA, E. D.; TSUKADA, M.; FREITAS, L.A.P. Secagem por atomização na indústria alimentícia: fundamentos e aplicações. In: **JORNADA CIENTÍFICA DA FAZU/FACULDADES ASSOCIADAS DE UBERABA**, v.5, 20--?, Uberaba, Anais... Uberaba: FAZU, 20--?.

SALEH, S. N. CFD Simulations of a co-current spray dryer. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 62, p. 772–777, 2010.

SCOTT, G.; RICHARDSON, P. The application of computational fluid dynamics in the food industryTrends in Food Science and Technology. **Trends in Food Science and Technology**, v 8, p. 119–124, 1997.

SABLANI, S.; DATTA, A. K.; RAHMAN, M. S.; MUJUMDAR, A. S.. **Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques**. Boca Raton, Florida: CRC Pres. 2007.

SILVA, D. O. **Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones Mediante Modificações Geométricas**. 2012. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SIMPSON, R. **Engineering Aspects of Thermal Food Processing**. Contemporary Food Engineering series, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2009.

SUN, D. W. **Computational fluid dynamics in food processing**. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis Group. 2007.

VARZAKAS, T.; TZIA, C. **Handbook of Food Processing: Food Preservation**. New York: CRC Press. 2015. 748 p.

XIA, B.; SUN, D.-W. W. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 34, n. 1–3, p. 5–24, 2002. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/compag>.