

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA

Aline Tampke Dombrowski

**MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO 3D DA
DISTRIBUIÇÃO DO AR EM SECADORES DE FLUXO MISTO**

Ijuí - RS
Abril de 2019

ALINE TAMPKE DOMBROWSKI

**MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO 3D DA
DISTRIBUIÇÃO DO AR EM SECADORES DE FLUXO MISTO**

Projeto de Dissertação apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, pelo Curso de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Osório Binelo
Co-orientador: Prof. Dr. Oleg Khatchatourian

Ijuí - RS
Abril de 2019

UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
DCEEEng - Departamento de Ciências Exatas e Engenharias

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

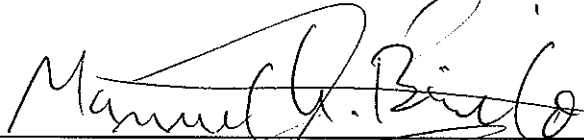
**MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO 3D DA DISTRIBUIÇÃO
DO AR EM SECADORES DE FLUXO MISTO**

Elaborada por

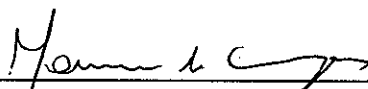
ALINE TAMPKE DOMBROWSKI

Como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem
Matemática

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Manuel Osório Binelo (Orientador/DCEEEng/UNIJUÍ)



Prof. Dr. Mauricio de Campos (DCEEEng/UNIJUÍ)



Profa. Dra. Adriana Soares Pereira (UFSM)

Ijuí, RS, 05 de abril de 2019.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de cursar este mestrado, por me dar saúde, força e energia para concretizar esse sonho.

Ao orientador Prof. Dr. Manuel Osório Binelo, ao coorientador Prof. Dr. Oleg Khatchatourian e a Prof^a. Dr. Vanessa Faoro pelas orientações, dedicação, conhecimentos, eficiência, sugestões, paciência e pelos auxílios prestados durante o desenvolvimento da pesquisa para a concretização deste trabalho.

À minha família pelo apoio, pela compreensão e o carinho demonstrados durante este período em que estive pouco presente. Agradeço por todo o amor e atenção que sempre tiveram comigo.

Aos meus amigos, os que trago de outras datas e aqueles que fiz durante o mestrado, que sempre me incentivaram e me apoiaram, e as minhas colegas companheiras de chimarrão, que tanto me ajudaram e me ouviram durante esta caminhada.

Aos professores e colegas do Programa de Mestrado e Doutorado em Modelagem Matemática, pela experiência, profissionalismo, conhecimentos compartilhados, amizade e apoio prestados no decorrer do mestrado.

A empresa Cambaí pela disponibilidade e ajuda na coleta de dados.

As secretárias do curso pelo profissionalismo e pelos auxílios prestados.

À CAPES pela bolsa de estudos.

A todos que de uma ou outra forma ou outra contribuíram para a realização desta pesquisa. Muito obrigado!

"Ser feliz não é ter uma vida perfeita. Mas usar as lágrimas para irrigar a tolerância. Usar as perdas para refinar a paciência. Usar as falhas para esculpir a serenidade. Usar a dor para lapidar o prazer. Usar os obstáculos para abrir as janelas da inteligência"

Augusto Cury

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO 3D DA DISTRIBUIÇÃO DO AR EM SECADORES DE FLUXO MISTO

RESUMO

Após a colheita, os grãos possuem umidade elevada, não podendo ser armazenados nessas condições, pois esta danifica os grãos em curto período. Assim, estes devem ser submetidos ao processo de secagem, que tem o objetivo de reduzir o teor de umidade presente nos grãos, até um percentual adequado para o armazenamento, sem alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas dos grãos. Portanto, é importante um sistema de secagem adequado e eficiente, abrangendo um fluxo de ar uniforme em toda a massa porosa dos grãos, para minimizar as perdas. Embora muitas pesquisas sobre secagem de grão já tenham sido desenvolvidas, a análise do fluxo do ar mostra-se escassa na literatura. Desse modo, o presente estudo tem por objetivo modelar matematicamente e computacionalmente a distribuição do fluxo do ar dentro de um sistema real de secagem de grãos, confrontando os resultados da simulação com os dados observacionais. O fluxo do ar 3D foi resolvido por meio do Método dos Elementos Finitos, com geometrias e malhas tetraédricas de sistemas reais de secagem de grãos, e para validar a efetividade da distribuição do ar foi utilizado o critério de vazão. A partir do desenvolvimento dos experimentos e das comparações com as simulações computacionais foi possível realizar a análise da pressão e a velocidade do ar. Foi realizada a análise de distribuição do ar dentro do secador. Desse modo, a fim de validar os resultados obtidos, foram coletadas as pressões estáticas em vários pontos do sistema real de secagem, realizando as devidas comparações entre os resultados simulados e experimentais e analisando o coeficiente de determinação, foi validado o modelo matemático, sendo que esse pode ser utilizado para otimizar o sistema real de secagem desde que observadas as diferenças de porosidade causadas pela umidade e movimentação dos grãos.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos; Secagem de grãos; Simulações 3D; Fluxo de ar.

ABSTRACT

After harvesting, the grains have high humidity and cannot be stored in these conditions, as they are sufficient to damage the grains in the short period. Thus, these should be subjected to the drying process, which aims to reduce the moisture content present in the grains, up to a percentage suitable for storage, without altering the physical, chemical and biological properties of the grains. Due to this bias, an adequate and efficient drying system is important, encompassing a uniform airflow across the porous mass of the grains to minimize losses. Although many researches on grain drying have already been developed, air flow analysis is scarce in the literature. Thus, the aim of this study is to mathematically and computationally model the distribution of air flow within a real grain drying system, confronting the simulation results with the observational data. The 3d air flow was solved by means of the finite element method, with geometries and tetrahedral meshes of real grain drying systems and to validate the effectiveness of air distribution, the specific flow criterion was used. From the development of the experiments and comparisons with the computational simulations it was possible to perform the analysis of air pressure, air velocity and analyze the distribution of heat transfer in the grain mass. The analysis of air distribution in the dryer was performed. Thus, in order to validate the obtained results, the static pressures were collected at various points of the real drying system, performing the appropriate comparisons between the simulated and experimental results and analyzing the coefficient of determination, was Validated the mathematical model, and this can be used to optimize the real drying system, thus being something more feasible, practical and more accessible.

Keywords: Finite element method; Grain drying; 3d simulations; Air flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução da área de trigo.....	18
Figura 2 -Mapa da produção agrícola – Trigo.....	18
Figura 3 - Cadeia da produção de grãos	19
Figura 4 - Porosidade intergranular	23
Figura 5 - Desenho esquemático das dimensões características do grão de trigo.	25
Figura 6 - Esquema geral dos tipos de fluxos de ar em secadores	33
Figura 7 - Secador de Fluxo Cruzado	35
Figura 8 - Secador de Fluxo Concorrente.....	36
Figura 9 - Diagrama do Fluxo de Ar e Grão no Secador de Fluxo Misto	37
Figura 10 - Secador de Fluxo Misto	38
Figura 11 - Secador de coluna de fluxo misto	39
Figura 12(a) Fornalha.....	44
Figura 12(b) - Ventiladores	44
Figura 13 - Calhas do secador investigado (visão superior).....	45
Figura 14 - Estrutura do secador investigado	46
Figura 15 - Coleta dos dados através do anemômetro.....	47
Figura 16 - Coleta da pressão através do manômetro.....	47
Figura 17 - Vazão específica local	50
Figura 18 - Representação dos tetraedros, e seus respectivos vértices, que formam a geometria	52
Figura 19 - Fluxograma do gerador de malha da massa de grãos	59
Figura 20 - Pontos da coleta experimental da velocidade do ar logo após a massa de grãos...	62
Figura 21 - Local de coleta das pressões	64
Figura 22 - Malha tetraédrica para análise pelo MEF	66
Figura 23 - Distribuição de pressão.....	67
Figura 24 - Velocidades nas saídas considerando porosidade 0.43.....	68
Figura 25 - Velocidade na saída, considerando porosidade 0,48	69
Figura 26 - Distribuição de velocidade para porosidade 0.48	69
Figura 27 - Distribuição das linhas de fluxo.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa específica global de algumas variedades de grãos	21
Tabela 2 - Ângulo de repouso de algumas espécies de grãos.....	22
Tabela 3 - Porosidade de espécies de grãos de acordo com o percentual de umidade	24
Tabela 4 - Forma e tamanho de algumas variedades de grãos	26
Tabela 5 - Índice de umidade recomendado para a colheita.....	28
Tabela 6 -Esquema de secadores conforme suas características	32
Tabela 7 - Informações do secador investigado	44
Tabela 8 - Resultados experimentais da velocidade do ar	63
Tabela 9 - Resultados experimentais da pressão do ar	64

LISTA DE SÍMBOLOS

- E_{vazio} – Espaço vazio entre a massa de grãos armazenados, m³;
- $gradP_0$ – Gradiente de pressão sem compactação;
- $gradP_H$ – Gradiente de pressão com compactação;
- A, B, C – Constantes que dependem do tipo e condição do grão;
- ε – Porosidade (decimal);
- V_{total} – Volume total ocupado pela massa de grãos, m³;
- H – Altura da camada de grãos (m);
- $c(H)$ – Função de compactação;
- $L(x)$ – Comprimento da trajetória que passa no ponto x;
- m – Metro;
- cm – Centímetro;
- RPM – Rotações por minuto (rpm, RPM, r/min, r. min^{-1} , rot/min, ou rot. min^{-1});
- F_M – Fator de fricção (adimensionamento);
- FA – Densidade do fluxo do ar;
- F – Teor de finos;
- K – Coeficiente que depende do produto;
- $\vec{K}$ – Permeabilidade direcional;
- K_x – Coeficiente de permeabilidade máxima;
- K_y – Coeficiente de permeabilidade mínima;
- K_z – Coeficiente de permeabilidade máxima;
- c – Função de compactação;
- P – Pressão do ar em Pascal (Pa);
- P_H – Pressão com altura H ;
- P_0 – Pressão inicial;
- n – Vetor unitário normal a superfícies da parede do armazém;
- Q – Vazão volumétrica por unidade de área (m³/s.m²);
- Q_a – Vazão específica total de ar em m^3s^{-1} ;
- Re – Número de Reynolds;

i – Número de estágio de aeração correspondente a entrada;

t_i – Tempo de aeração com apenas uma entrada (i);

S – Seção transversal do secador;

U – Argumento intermediário;

V – Velocidade do ar (m/s);

V_T – Volume do tetraedro;

w – Vetor de velocidade (m/s);

ΔP – Variação da pressão estática com a profundidade (mm CA);

ρ – Massa específica do ar (Kg/m³); Densidade do produto;

q – Vazão específica local;

i, j, k, l – Nós do tetraedro;

u, v, w – Componentes de velocidade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	O trigo.....	17
2.1.1	Propriedades Físicas e Morfológicas dos Grãos.....	20
2.1.2	Massa específica dos grãos.....	20
2.1.3	Ângulo de repouso.....	21
2.1.4	Ângulo de atrito.....	22
2.1.4.1	Porosidade.. ..	23
2.1.4.2	Tamanho e Forma dos Grãos.....	24
2.1.4.3	Teor de Umidade	26
2.2	Secagem de Grãos	27
2.2.1	Sistemas de secagem	30
2.2.2.	Secadores de grãos	31
2.2.2	Equipamentos de Secagem.....	31
2.3	Trabalhos relacionados.....	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	Estudo Experimental	43
3.1.1	Sistema Real de Secagem de Grãos	43
3.1.2	Processo Experimental	46
3.2	Modelo Matemático	47
3.2.1	Avaliação de Aeração.....	49
3.3	Método dos Elementos Finitos	51
3.4	Programas e Ferramentas Computacionais	59
3.4.1	Desenvolvimento da Geometria	59
3.4.2	Elaboração da Malha com o TetGen	60
3.4.3	Resolvedor do Sistema	61

3.4.4	Pós-processamento	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1	Resultado Experimental	62
4.2	Simulações Numéricas	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

A agricultura, em especial a produção de grãos, teve um grande avanço nos últimos anos devido ao processo de modernização, consequentemente, é considerada uma das principais atividades econômicas do Brasil. Estima-se que para safra de trigo 2018/19 houve um aumento anual de área plantada na ordem de 6,6%. Quanto à quantidade produzida houve um acréscimo de 27,3%, totalizando 5.427,6 mil toneladas. A produtividade apresentou aumento de 19,4% (2.657 kg/ha), apesar dos problemas climáticos ocorridos nos principais estados brasileiros produtores, Paraná e Rio Grande do Sul (CONAB, 2018).

Constata-se que o cultivo do trigo não é muito relevante em relação à soja, porém através do plantio dessa cultura, ocorrem vários benefícios ao solo, com bom incremento de matéria seca e de raízes, melhorando a conservação do mesmo, ao manejo de plantas daninhas, otimização de maquinário e mão de obra e, quando bem conduzida, melhora a renda da propriedade (EMBRAPA, 2018).

Esses grãos colhidos pelos agricultores, e antes de serem destinados às empresas alimentícias devem ser submetidos ao processo de pós-colheita, obtendo-se assim o ajuste de suas características morfológicas para o nível de qualidade exigido pela CONAB. Após a colheita, os grãos são entregues em unidades de armazenamento e beneficiamento com teores de impurezas e umidades elevados, os quais são submetidos a um processo de pré-limpeza, secagem, limpeza pós secagem, armazenamento para em seguida serem expedidos (WEBER, 2005).

Assim, é interessante que por meio destes procedimentos, considerando-se desde o plantio até a expedição, resultam em um alto índice de perdas. Portanto, torna-se indispensável que esses processos ocorram corretamente para evitar perdas maiores (NETO et al. 2018).

Dessa maneira, é viável realizar o processo de secagem o mais breve possível, após a colheita, para evitar mais perdas devido à proliferação de fungos nos grãos com alta umidade. Diante disso, o processo de secagem dos grãos é considerado um dos processos mais importantes para a preservação da qualidade dos grãos, esse processo de secagem pode ser realizado naturalmente ou por processo artificial.

O processo de secagem artificial de grãos é realizado através de secadores industrializados, os quais existem em vários modelos, citados no desenvolvimento deste trabalho. É válido ressaltar que, nesta pesquisa, o secador de fluxo misto destaca-se, pois será estudado o fluxo do ar durante o processo de secagem de grãos de um secador deste tipo. Nessa

perspectiva, secadores de fluxo misto são amplamente utilizados na agricultura em todo o mundo para a secagem de diversos tipos de grãos, sendo considerados um dos melhores quando refere-se à qualidade final dos grãos (WEBER, 2005).

Visando obter a qualidade dos grãos, as áreas de armazenamento e secagem vêm sendo amplamente estudadas, como em Bortolaia (2011), Park (2007), Weber (1998, 2005), entre outros. Apesar de existirem várias pesquisas envolvendo a secagem dos grãos, poucos destes avaliam o efeito do fluxo do ar durante o processo de secagem.

Considerando o problema principal de modelar matematicamente e computacionalmente a distribuição do ar em secador de fluxo misto durante o processo de aeração em sistemas reais de secagem de grãos, confrontando dados simulados e observacionais obtidos, com intuito de melhorar o desempenho do sistema e controle do processo de aeração do secador, tem-se como objetivos específicos: (a) coletar informações de um sistema real de secagem de grãos, referente à entrada e saída do ar; (b) coletar resultados experimentais, referente à pressão estática em diferentes pontos da saída do ar que estava na massa dos grãos; (c) criar geometria e malha tetraédrica com condições não uniformes da massa de grãos do sistema real de secagem; (d) contribuir com a implementação de um modelo matemático capaz de fazer a simulação tridimensional da distribuição do fluxo de ar em secadores, visando uma melhora econômica e qualitativa; (e) realizar simulações numéricas em secadores de grãos de fluxo misto através de dados de um sistema real e (f) validar o modelo com dados experimentais.

Para abordar o tema desta pesquisa, este trabalho está dividido em cinco capítulos. No segundo capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica dos temas abordados na dissertação o embasamento teórico sobre a importância da cultura do trigo a fim de situar e contextualizar o leitor sobre a aplicação da presente modelagem. No terceiro capítulo, apresenta-se a metodologia usada. Nesse item, é exposto o estudo experimental, que abrange a forma da coleta de dados experimentais, bem como as informações sobre o sistema real de secagem de grãos. São descritos detalhes sobre a simulação 3D do sistema de aeração e o modelo matemático implementado no processo, através da aplicação do Método dos Elementos Finitos. No quarto capítulo, são apresentados os resultados e discussões do processo realizado. Apresenta-se também a validação das simulações através da comparação dos resultados reais e simulados. Enfim, no quinto capítulo, são apresentados os resultados da pesquisa, considerando o referencial bibliográfico, coleta e análise de dados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, apresenta-se a revisão bibliográfica, um breve histórico da produção de trigo, posteriormente são detalhadas algumas características fisiológicas dos grãos, que exercem influência sobre seu escoamento. Em seguida é apresentado um breve estudo sobre secagem e armazenagem dos grãos.

2.1 O TRIGO

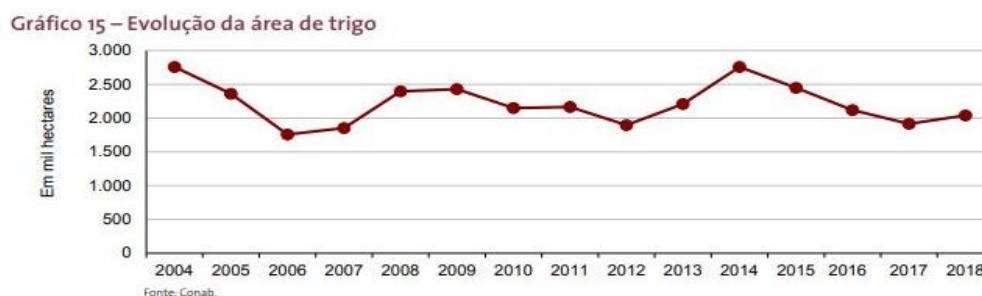
O trigo originou-se na antiga Mesopotâmia, o homem era nômade e os cereais eram plantados manualmente. No Brasil a produção e comercialização de trigo iniciou em 1534, com a vinda de Martim Afonso de Souza realizada na Capitania de São Vicente (AMBROSI et al., 2000).

O trigo corresponde a aproximadamente 30% da produção global de grãos, sendo destinada a produtos alimentícios para humanos e animais, e não alimentícios, como a geração de energia renovável (EMBRAPA, 2018).

O Brasil chegou a exportar mais de 13 mil toneladas, porém com a chegada da ferrugem por exemplo, ocorreu uma queda chegando a um pouco mais de 2 mil toneladas apenas, posteriormente foram realizadas pesquisas para resolver o ocorrido, o que ocasionou o aumento na produção novamente (CUNHA, 1999).

Em vários países, o trigo é cultivado, pois é um dos cereais mais produzidos, principalmente pelos seus derivados como: pães, massas, bolos, entre outros. Além do mais os alimentos derivados do trigo são boas fontes de carboidratos, proteínas, ferro, zinco, selênio e magnésio entre outros elementos, além de conter muita fibra alimentar, é um grão cultivado em larga escala e em vários países do mundo (MUNDSTOCK, 1999). A seguir percebe-se a evolução da área de trigo nos últimos anos.

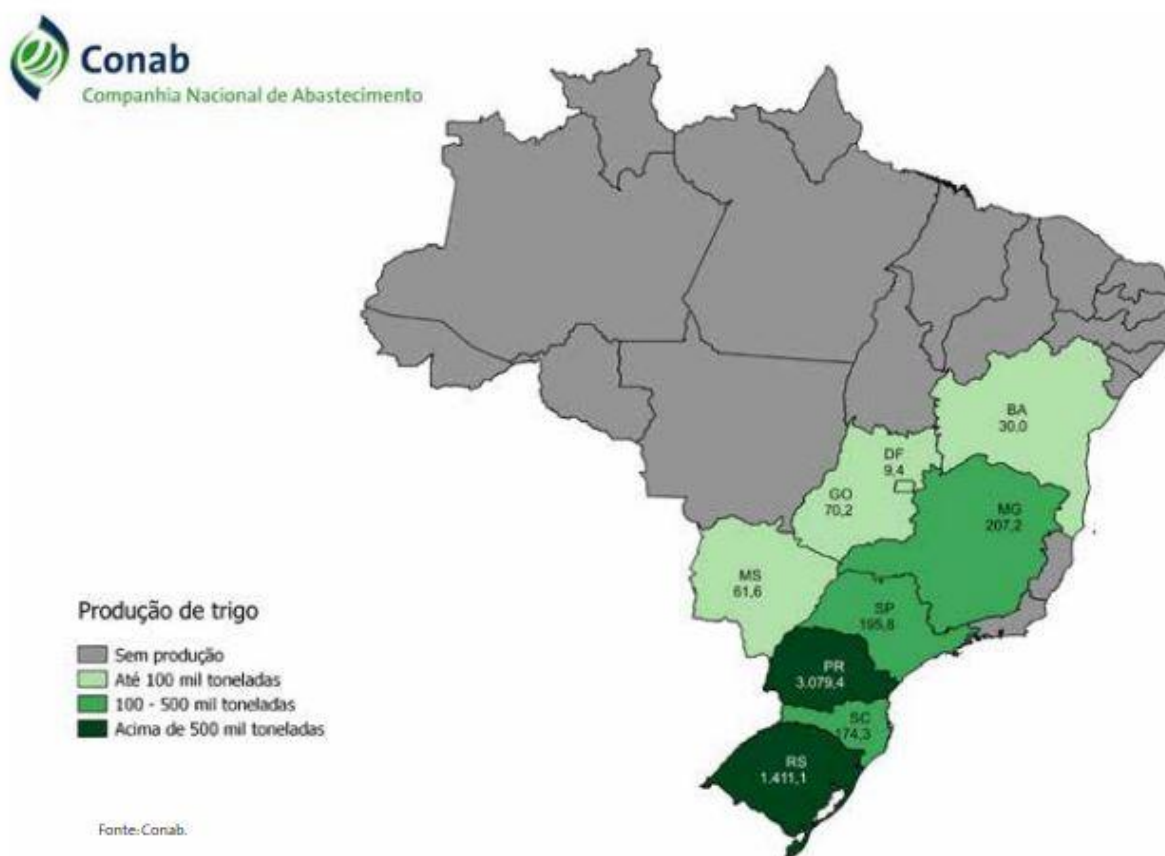
Figura 1- Evolução da área de trigo



Fonte: Conab (2018)

O trigo vem evoluindo devido ser uma cultivar que além de ser um alimento básico utilizado na produção de farinha, é um dos principais alimentos dos animais através do farelo de trigo, na forma de feno, ensilagem ou naturalmente em pastejo (HASTENPFLUG, 2009). A Figura a seguir demonstra a produção de trigo no Brasil, em que a Região Sul destaca-se.

Figura 2 -Mapa da produção agrícola – Trigo



Fonte: Conab (2018)

Pesquisas realizadas pela Conab concluem que a safra 2018/19 tende a aumentar, a área plantada, produtividade e produção nacional. A estimativa é de que a safra brasileira atinge um total de 5.239 mil toneladas, volume 22,9% superior ao registrado na temporada 2017/18. Espera-se que mantenha-se estável o consumo nacional, e que o Brasil importe um volume na ordem de 6,3 milhões de toneladas, mantendo um estoque final de pouco mais de 2,2 milhões de toneladas do grão (CONAB, 2018).

Essa produção resulta em um processo dentro da logística, as quais são considerados basicamente três elementos globais, segundo Azevedo et al (2008), recebimento, armazenagem e expedição. Conforme demonstrado na Figura 3, após o plantio do trigo, o produto colhido é colocado em um transporte, no qual é levado para cooperativas ou encaminhado para silos próprios, posteriormente ocorre o processo de secagem e os grãos são destinados ao armazenamento, ficando por tempo indeterminado em seu destino.

Figura 3 - Cadeia da produção de grãos



Fonte: Autor

A expedição corresponde ao processo de separar os grãos armazenados em um determinado local, movimentando-os para outro lugar com o objetivo de atender a uma demanda específica e agregar valor ao produto.

2.1.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DOS GRÃOS

Os grãos quando colhidos, ou seja, quando desligados biologicamente da planta, continuam respirando, pois são seres vivos e, como tal, liberam gás carbônico (CO₂), água (H₂O) e calor. Weber (1998) afirma que, se a umidade do grão for elevada, maior será a liberação de calor. Portanto, dependerá da umidade para ocorrer essa liberação de forma mais ou menos intensa. Este comportamento acaba prejudicando a massa dos grãos e dificultando o armazenamento, pois quando existe uma umidade elevada acaba acelerando significativamente o processo respiratório, aumentando a temperatura e compromete a conservação.

Segundo Ribeiro et al (2005), é necessário ter um cuidado adequado durante o processo de secagem para evitar que os grãos fiquem com a umidade elevada. Entretanto, ainda podem ocorrer alterações nas propriedades físicas e químicas, visto que estas propriedades influenciam diretamente na dinâmica de secagem.

Em suma, torna-se importante efetivar uma correta secagem dos grãos e, para isso, é fundamental conhecer as propriedades físicas e morfológicas do grão, pois estes, influenciam diretamente na dinâmica de secagem. Assim como se deve considerar a massa dos grãos como um sistema ecológico, é pertinente também conhecer as propriedades do grão que tem maior relevância em um sistema de armazenamento. Pois, por ser um organismo vivo, os grãos sofrem alterações físicas, químicas e biológicas, os quais podem ocasionar a deterioração dos mesmos (PEREIRA, 1995).

2.1.2 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Para determinar a massa específica dos grãos (ρ_g) existem duas maneiras distintas, as quais estão descritas a seguir:

- Massa específica real – é determinada pela razão entre a massa total dos grãos e o volume ocupado pelos grãos, isso descontando o espaço intergranular proporcionado pelo ar, conforme a Equação (2.1).

$$\rho_{gr} = \frac{m_g}{v_g} \quad (2.1)$$

onde, mg é a massa total de grãos e v_g é o volume somente dos grãos.

- Massa específica global – é determinada pela relação entre a massa dos grãos e o volume total ocupado pelos grãos, contando com os espaços intergranulares, representado na Equação (2.2).

$$\rho_{gg} = \frac{mg}{V} \quad (2.2)$$

onde, V representa o volume total ocupado pela massa de grãos.

A tabela a seguir apresenta a massa específica global de alguns tipos de grãos cultivados na região.

Tabela 1 - Massa específica global de algumas variedades de grãos

Variedade	Massa específica granular ($kg.m^3$)
Aveia	412,0
Milho	721,0
Soja	772,0
Trigo	772,0

Fonte: Adaptado de CORREA & SILVA (2008) apud BROOKER, et al. (1961)

Diante disso, torna-se importante, obter a massa específica dos grãos quando houver interesse em realizar cálculos relacionados ao dimensionamento de silos, secadores, depósitos e sistemas de transporte, bem como a determinação de umidade e cálculos de possíveis perdas causadas por insetos e pragas durante o armazenamento (CORRÊA, P.; SILVA, J., 2008).

2.1.3 ÂNGULO DE REPOUSO

O ângulo de repouso consiste no ângulo máximo do volume de grãos amontoados em relação ao plano horizontal devido ao coeficiente de fricção entre as partículas do material granular (BALBINOT, 2017; NUNES, 2014).

Além de depender do tipo de grão, o ângulo é afetado pela granulometria (tamanho e forma) e pelo teor de umidade do material (BALBINOT, 2017; FERREIRA, 2017). A sua utilidade se dá para determinar a capacidade estática dos silos, a capacidade das correias transportadoras e o dimensionamento das moegas, dos dutos e das rampas de descarga dos grãos (CORRÊA, P.; SILVA, J., 2008).

Nessa perspectiva, o ângulo de repouso é determinado através de alguns fatores que geralmente aumentam o ângulo, como a esfericidade, o tamanho, o atrito, a umidade e as impurezas. Alguns ângulos de repouso estão representados na tabela 2.

Tabela 2 - Ângulo de repouso de algumas espécies de grãos

Variedade	Ângulo de repouso (graus)
Aveia	26 – 32
Cevada	16 – 26
Feijão	27 – 32
Milho	27
Soja	29
Sorgo	33
Trigo	25 – 29

Fonte: PARK, et al. (2007), apud (BALBINOT, 2017)

2.1.4 ÂNGULO DE ATRITO

Conforme descrito em Šmilauer (2016), o atrito é definido pela fricção entre dois corpos. O ângulo de fricção entre dois corpos é definido numericamente como:

$$\phi = \arctan(\mu_s) \quad (2.3)$$

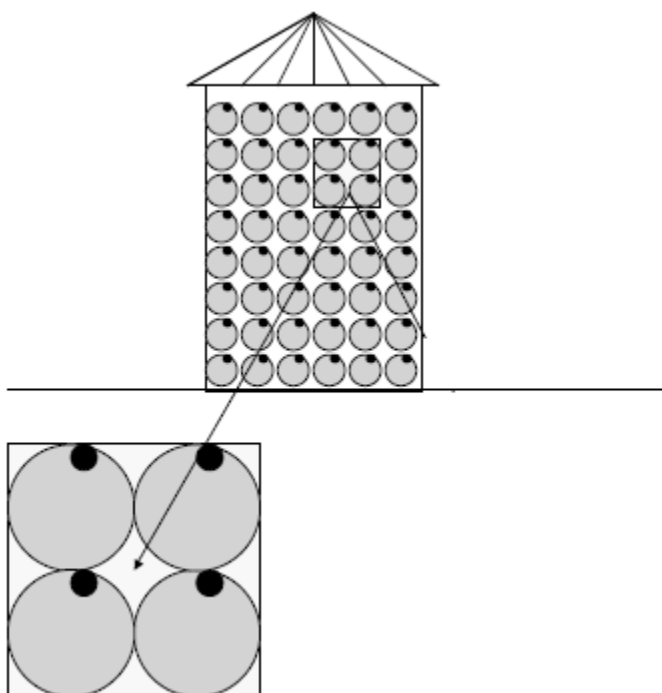
sendo, μ_s o coeficiente limite de fricção estática.

Ou seja, se considerarmos um bloco sobre um plano horizontal fixo, o ângulo de fricção é o ângulo em que o bloco começa a deslizar.

2.1.4.1 Porosidade

Porosidade é o espaço vazio ocupado pelo ar existente de uma massa de grãos, conforme demonstrado na Figura 4. Por sua vez, a porosidade facilita o escoamento do ar, além de influenciar na capacidade do silo (PARK et al, 2007). Esta pode variar de acordo com a massa de grão, entre 30 a 50%, conforme tipo, teor de umidade e quantidade de grãos quebrados.

Figura 4 - Porosidade intergranular



Fonte: MATA, 2002.

A porosidade intergranular de um produto, está inserida no dimensionamento de várias estruturas como silos, contêineres, caixas, unidades de transportadoras, além de estar presente nos estudos de transferência de calor e massa, fluxos entre outros.

É de grande relevância mencionar que os grãos quebrados diminuem as dimensões dos poros, o que consequentemente dificulta o escoamento do ar. Essas impurezas, principalmente as finas, preenchem os espaços vazios, diminuindo a porosidade. Assim, os grãos úmidos apresentam menor porosidade com maior dimensão dos poros em relação aos grãos secos, pois

possuem maior volume. A seguir destaca-se a porosidade de algumas das diferentes variedades de grãos cultivadas na região.

Tabela 3 - Porosidade de espécies de grãos de acordo com o percentual de umidade

Variedade	% de umidade b.u.	% porosidade
Arroz	14,2	46,5
Aveia	10,9	47,6
Milho	9,9	40,0
Soja	7,4	36,1
Trigo	10,9	40,1

Fonte: PARK, et al. (2007)

A massa porosa é formada pelos próprios grãos e pelo espaço entre eles. De tal modo que essa porosidade torna-se a relação entre o volume ocupado pelo ar existente na massa de grãos e o volume total ocupado por esta massa, tendo influência sobre pressão de fluxo de ar que atravessa a massa de grãos, denotada pela equação (2.4) (KWIATKOWSKI,2011).

$$\varepsilon = \frac{E_{VAZIO}}{V_{TOTAL}} \quad (2.4)$$

ε -porosidade, decimal;

E_{VAZIO} - espaço vazio entre a massa dos grãos armazenados, m³;

V_{TOTAL} - volume total ocupado pela massa de grãos, m³;

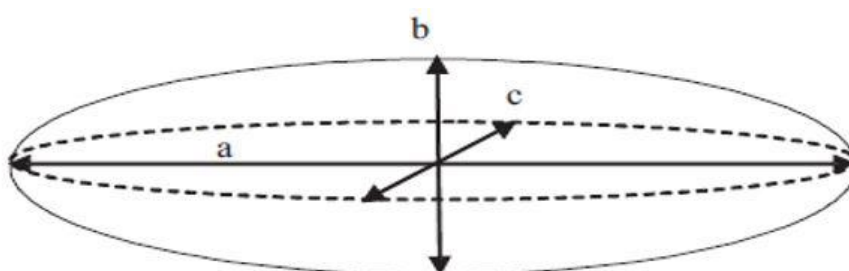
2.1.4.2 Tamanho e Forma dos Grãos

O tamanho e a forma dos grãos diferem de acordo com cada cultura, sendo definidas geneticamente e influenciadas pelo ambiente Para obter-se o correto dimensionamento do secador é importante conhecer estas características, assim como é de extrema importância para os equipamentos utilizados no processo de separação e classificação dos grãos (CORRÊA, P.; SILVA, J., 2008).

O tamanho do grão é dado através das dimensões de seu comprimento, largura e espessura. O formato dos grãos de trigo possuem formato variando entre ovalado, alongado e truncado (SCHEEREN; CASTRO; CAIRÃO, 2015).

Mediante as contribuições teóricas, percebe-se que a forma dos grãos pode ser determinada pela esfericidade (E) e circularidade (C), a partir das dimensões características (Figura 5) e considerando as Equações (2.5) e (2.6) (CORRÊA, *et al.*, 2006; CORRÊA, P.; SILVA, J., 2008; GUEDES *et al.*, 2011).

Figura 5 - Desenho esquemático das dimensões características do grão de trigo.



Fonte: Corrêa, *et al.* (2006)

$$E = \left[\frac{(a \cdot b \cdot c)^{1/3}}{a} \right] \cdot 100 \quad (2.5)$$

$$C = \left(\frac{b}{a} \right) \cdot 100 \quad (2.6)$$

sendo, a , b e c , respectivamente, o maior eixo, o eixo médio e o menor eixo do grão (mm).

Por conseguinte, compreende-se que, quanto mais próximos da unidade estiverem os valores da circularidade e da esfericidade, mais próximo da forma de um círculo ou mesmo de uma esfera estará o grão (CORRÊA, P.; SILVA, J., 2008). Essa constatação pode ser vista na tabela 4, os valores da esfericidade e dos eixos a , b e c de algumas variedades de grãos, conforme suas respectivas umidades em base úmida.

Tabela 4 - Forma e tamanho de algumas variedades de grãos

Variedade	% de umidade b.u.	% esfericidade	Semi-eixo <i>a</i> (mm)	Semi-eixo <i>b</i> (mm)	Semi-eixo <i>c</i> (mm)
Alfafa	5,8	65,6	2,3	1,5	1,0
Arroz	8,9	46,7	8,5	3,1	2,3
Aveia	8,7	34,2	12,9	2,9	2,3
Cevada	7,8	44,5	10,4	3,5	2,7
Linho	6,5	45,1	5,2	2,6	1,0
Milheto	9,2	84,7	4,3	4,1	2,8
Trigo	7,7	61,5	6,6	3,2	3,1
Soja	9,0	90,8	6,4	5,9	5,2

Fonte: Adaptado de (CORRÊA; SILVA, 2008) apud (MOSEFENIN, 1978)

2.1.4.3 Teor de Umidade

Os grãos possuem a capacidade de liberar e receber umidade, pois são um meio higroscópico, o qual é composto por matéria seca e matéria úmida. Segundo Bortolaia (2011) a matéria úmida pode ser dividida em três formas básicas, essas podem ser definidas conforme descritas a seguir:

- *Umidade superficial*: é a umidade encontrada na parte externa dos grãos, sendo em estado líquido e de fácil evaporação;
- *Umidade intersticial*: é a umidade encontrada no interior dos grãos, nos chamados canais intersticiais. Durante o processo de secagem, a umidade é forçada a sair, pois a pressão interna do grão aumenta, isso ocorre devido ao gradiente de pressão osmótica entre as partes interna e externa dos grãos.
- *Umidade de constituição*: Ligada diretamente às moléculas dos grãos, sendo os componentes do grão, assim como vitaminas, proteínas, carboidratos, enzimas e gorduras. Portanto não se indica remover essa umidade, pois resulta na alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do grão;

O teor de umidade presente no grão pode ser expresso de duas formas, são elas: teor de umidade em base úmida (M_{bu}), descrito pela Equação (2.7) e teor de umidade em base seca (M_{bs}), descrito pela Equação (2.8) (BORTOLAIA, 2011):

$$M_{bu} = \frac{m_w}{m_{gu}} \cdot 100 \quad (2.7)$$

onde m_w representa a massa de água no grão (Kg) e m_{gu} representa a massa do grão úmido ou matéria úmida (Kg).

$$M_{bs} = \frac{m_w}{m_{gs}} \cdot 100 \quad (2.8)$$

onde m_{gs} é a massa do grão seco (Kg).

A conversão entre essas bases é expressa pelas seguintes equações:

$$M_{bu} = \frac{m_{bs}}{100 + m_{bs}} \quad (2.9)$$

$$M_{bs} = \frac{m_{bu}}{100 - m_{bu}} \quad (2.10)$$

O fator mais importante para a qualidade final dos grãos armazenados é o teor de umidade, pois se mantidos em níveis de umidade adequados, reduz o desenvolvimento de micro-organismos e pragas (BIHAIN, 2011).

Isso ocorre quando a pressão de vapor de água dentro do grão se iguala a pressão de vapor presente no ar, não ocorrendo mais secagem (TRINDADE, 2013). A umidade de equilíbrio varia de acordo com cada produto, dependendo de fatores físicos e químicos. Oleaginosas apresentam valores de umidade de equilíbrio menores em comparação a alimentos ricos em amido, quando expostos a condições iguais de temperatura e umidade relativa (BIHAIN, 2011).

2.2 SECAGEM DE GRÃOS

O processo de secagem de grãos tem por objetivo retirar a umidade elevada presente nos mesmos. Para Weber (2005) a secagem consiste na retirada da umidade por evaporação, ainda destaca que não é possível a armazenagem dos grãos sem que haja o rebaixamento da umidade original da colheita para um nível de umidade segura.

Um dos fatores mais importantes no processo de secagem é a temperatura do ar, pois temperaturas demasiadamente elevadas prejudicam a qualidade dos grãos. Nessa perspectiva

Puzzi (2000) assegura que a secagem quando realizada em um período maior de tempo e com temperaturas não muito altas, reflete em um produto de melhor qualidade, pois o aumento demasiado da temperatura poderá provocar o cozimento do grão, prejudicando a qualidade final dos grãos.

Assim como a boa conservação por períodos prolongados depende desta umidade adequada dos grãos, esta também influenciará os percentuais de impureza e umidade, para que a incidência do desenvolvimento de insetos e fungos seja mínima. (BALBINOT, 2017; BARBOZA, 2016; BORTOLAIA, 2011; FAORO, 2014; LIMA, 2014; TRINDADE, 2013; WEBER, 1998). Para tanto, torna-se importante a realização correta da secagem dos grãos, saber o modo de conduzir processo, sem que afete termicamente ou mecanicamente os grãos, obtendo assim a qualidade e quantidade do produto (WEBER, 2005).

A secagem correta dos grãos é de grande relevância, já que é o principal responsável na qualidade dos grãos que serão armazenados, considerado assim mais importante que qualquer outro processo pós-colheita - sem o devido rebaixamento da umidade original de colheita não é possível armazenar os grãos. Considera-se, então, que a umidade segura para o armazenamento esteja entre 12% e 14% dependendo do produto e do controle disponível no silo como termometria e aeração, recursos indispensáveis para a manutenção da qualidade dos grãos. Em suma, cabe ressaltar que os grãos são colhidos com valores de umidade acima do aceitável para a armazenagem, sendo em torno de 18% (WEBER, 2005). Segundo o Ministério da Agricultura, é recomendado um índice de umidade para a colheita, conforme segue na Tabela 5. (BRASIL, 2013).

Tabela 5 - Índice de umidade recomendado para a colheita

Produto	Umidade Recomendada (%)
Soja	18
Milho	26
Trigo	20
Arroz	24
Sorgo	20

Fonte: Ministério da Agricultura, Brasil (2013)

Durante o processo da secagem dos grãos, as umidades são removidas, sendo assim, a umidade não diminui de forma linear, ocorre que em espaços iguais de tempo, não se retiram

iguais quantidades de água, portanto por mais que os espaços de tempo sejam iguais a retirada da umidade ocorre cada vez menos, até o ponto que ocorre o fechamento dos canais do grão, em que dificilmente irá umidificá-lo novamente (WEBER, 2005).

Portanto, esse processo se efetiva pela evaporação da água do material biológico. Por isso, é imprescindível que haja calor para evaporar a umidade dos grãos. Através deste processo, de calor da fonte quente para o grão úmido que promoverá a evaporação da água e em seguida a transferência de massa arrastará o vapor formado. Esses procedimentos básicos de transferência de calor empregados indicam que será necessário a utilização de equipamentos para auxiliar que este processo ocorra (PARK, et al. 2007).

Durante o processo de secagem ocorre a transferência de calor, do ar para o grão, fazendo com que a água presente no grão evapore, e que o grão perca volume e massa (SILVA, 2000; BORTOLAIA, 2011). Somado a isso, os autores descrevem três períodos distintos de secagem, os quais dependem do tempo de cada processo para resultar na umidade adequada e equilibrada através do ar de secagem.

Quando aquecido o ar ambiente pelo secador, segundo Puzzi (2000), atinge-se duas finalidades, a primeira refere-se à pressão do vapor da água existente nos grãos, a qual é aumentada através do aquecimento dos próprios grãos, facilitando a saída da umidade. A segunda, aumenta a temperatura do ar ambiente onde a sua umidade relativamente diminui e consequentemente sua capacidade de absorver umidade aumenta. Com isso, a umidade dos grãos acompanha a diminuição da umidade relativa do ar secante, ocorrendo através deste a secagem do produto.

Os períodos de secagem são definidos em função do tempo necessário para a ocorrência do processo. São três períodos de secagem apresentados de acordo com Park et al (2007).

No primeiro período, a fase inicial de secagem, onde os grãos apresentam temperatura inferior que o ar, isso acaba fazendo com que a transferência de umidade seja lenta, pois é baixa a pressão de vapor de água na superfície do grão. Esse período permanece ativo até o momento em que a transferência de massa seja compensada pela transferência de calor.

No segundo período, ocorre a secagem constante, através do vapor d'água livre. Nesse processo as transferências de calor e de massa equilibram-se, isso ocorre até o momento em que a água se torna escassa.

No terceiro período, tem-se pouca quantidade de água a ser retirada, até que os grãos entram em equilíbrio com o ar não tendo mais secagem. Sendo que, deve-se levar em consideração a importância da temperatura do ar de secagem, pois temperaturas

demasiadamente elevadas prejudicam a qualidade dos grãos. Segundo Puzzi (2000), a secagem em um período maior de tempo e com temperaturas não muito altas, resulta em uma melhor qualidade final dos grãos, pois com uma temperatura elevada poderá causar o cozimento dos grãos.

Os principais mecanismos do transporte de água dos grãos, segundo as condições de secagem, ocorrem durante a difusão líquida através do transporte líquido devido a existência de gradientes de concentração de umidade, onde ocorre na verdade o transporte das moléculas. Também ocorre a difusão de vapor devido à pressão de vapor provocado pelo gradiente de temperatura necessário para evaporação da água líquida contida nos grãos. Assim como o transporte de líquido e vapor o qual ocorre devido a diferença de pressão total e capilaridade. (PARRY, 1985; PARK et al., 2007).

2.2.1 SISTEMAS DE SECAGEM

Para realizar o processo de secagem dos grãos existem vários modelos de secadores que apresentam suas especialidades conforme as técnicas de secagem utilizadas para diferentes tipos de grãos.

Desse modo, as secagens dos grãos são realizadas em secadores, estes por sua vez são construídos e comercializados sobre diversas formas atendendo variados tipos de produtores, desde os pequenos até grandes produtores, como também empresas e unidades recebedoras de grãos (cooperativas).

Existem dois sistemas de secagem utilizados para retirada da umidade dos grãos, a natural e a artificial (BORTOLAIA, 2011; BALBINOT, 2017; LIMA, 2014; SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000).

Vale salientar que a secagem natural é o método de secagem mais antigo, inicia ainda na lavoura na própria planta através da ação do vento e do sol até a percepção de que o grão alcance sua maturidade fisiológica. Posteriormente, acontece a colheita dos grãos, a secagem natural ocorre através da exposição dos grãos ao sol em camadas finas, em que se deve movimentar os grãos periodicamente para obter uma secagem mais homogênea. As principais vantagens deste método são o baixo custo, expondo em qualquer lugar que obtenha sol, e mão de obra não especializada. Porém, esse método dependerá das condições meteorológicas, além de oferecer uma quantidade maior de riscos através da incidência de pragas e doenças.

Quanto a secagem artificial, este é o método que realiza a secagem através de um fluxo forçado de ar aquecido que cruza pelos grãos, podendo esse processo ser tanto manual como também mecânico. Este processo, que tem um custo maior, é o mais indicado, pois apresenta algumas vantagens, as quais não dependem das condições meteorológicas, o processo de secagem é mais rápido e ainda o risco de incidência do desenvolvimento de fungos e microorganismos é bem baixo. Este método utilizando o fluxo de ar pode ser empregado de três maneiras: baixa temperatura, em que a temperatura do ar de secagem chega até 10°C acima da temperatura ambiente; alta temperatura, quando a temperatura do ar de secagem é superior a 10°C acima da temperatura ambiente; ou também através da combinação das duas formas citadas de fluxo do ar.

2.2.2. Secadores de grãos

Os secadores de grãos são utilizados para a realização da secagem artificial, os quais podem ser classificados a partir de sistemas de controle, fluxo dos grãos e fluxo de ar, registros entre outros recursos (WEBER, 2005). Podem ser classificados os secadores a partir de projeto envolvendo sua estrutura física e seu funcionamento, visando atender desde pequenos até grandes produtores (BALBINOT, 2017).

2.2.2 EQUIPAMENTOS DE SECAGEM

Os sistemas comerciais de secagem para grãos são classificados quanto a diversas características, algumas delas estão representadas na tabela 6.

Tabela 6 -Esquema de secadores conforme suas características

Classificação	Sistema de secagem
Quanto ao tipo de fabricação	Móveis ou fixos (silos secadores, de torre)
Quanto ao sistema de carga	Intermitente ou contínuos
Quanto à ventilação	Insuflação de ar ou aspiração de ar
Quanto ao fluxo do ar	Concorrente, contracorrente, cruzado ou misto
Quanto à torre de secagem	Calhas paralelas, calhas cruzadas, de colunas e com câmara descanso
Quanto ao sistema de descarga	Descarga de bandeja mecânica, descarga pneumática, descarga de eclusas rotativas
Quanto ao combustível	Líquido, sólido ou gasoso
Ar da fornalha	Direto e indireto
Grau de automatização	Secagem com controle manual e secagem automatizada

Fonte: Weber (1998)

Os sistemas de controle dos secadores podem ser tanto automáticos como manuais. Os de controle manuais são operados manualmente controlando a temperatura do ar e a umidade de entrada e saída do secador. Enquanto que os automáticos são caracterizados através de sistemas com cabos providos de sensores que controlam computacionalmente a temperatura do ar de entrada e saída do secador bem como, a umidade dos grãos, quando entram e saem deste (WEBER, 2005; BORTOLAIA, 2011; BALBINOT, 2017).

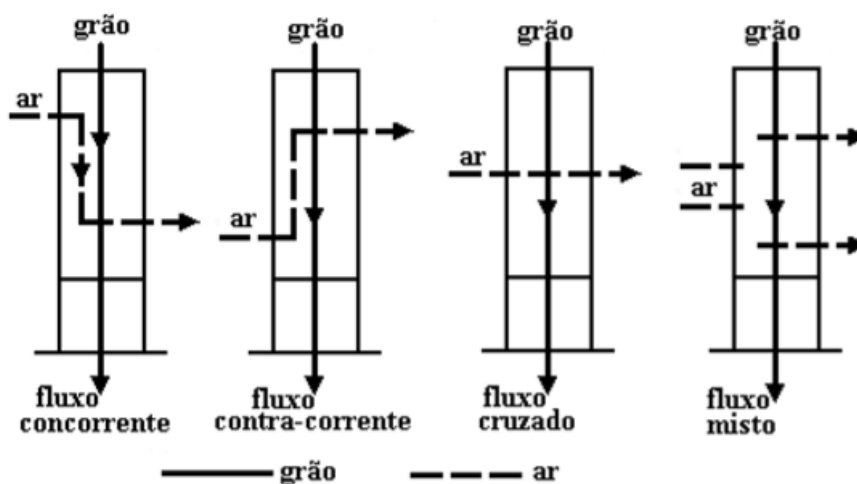
Quanto ao sistema de controle, os secadores são equipados com controles manuais, onde é operado manualmente o controle da temperatura do ar e umidade de entrada e saída do secador, ou automáticos, caracterizados pelo controle da temperatura do ar de entrada e saída do secador e da umidade dos grãos quando entram e saem do secador, através de sistemas providos de sensores de temperatura e de umidade, cabos e controladores computadorizados (WEBER, 2005; BORTOLAIA, 2011; BALBINOT, 2017).

Esses sistemas de secagem ocorrem através da movimentação do ar ao longo do secador podendo ser executada através de insuflação ou por exaustão, posteriormente através do secador e por último passa no ventilador (WEBER, 2005; BORTOLAIA, 2011; BALBINOT, 2017; TRINDADE, 2013).

No estado do Rio Grande do Sul, os mais utilizados e comercializados para secagem de grãos, são os do tipo torre, estes na sua maioria, utilizam como combustível a lenha, com fornalha de ar direto, secagem de controle automático computacionalmente, com fluxo de ar misto. Também são utilizados para pequenos produtores o silo secador com insuflação de ar e leito fixo, onde algumas cooperativas pequenas utilizam para secagem e armazenamento dos grãos (BORGES, 2002) (BORTOLAIA, 2011).

Existem vários tipos de secadores, e cada um com suas especificidades, contendo o fluxo ideal e mais adequado para o modelo específico, esses fluxos podem ser concorrentes, contracorrente, cruzado ou misto, conforme demonstra na Figura 6.

Figura 6 - Esquema geral dos tipos de fluxos de ar em secadores



Fonte: Weber (2005)

2.2.2.1 Secadores de leito fixo

Os grãos, em secadores de leito fixo, permanecem estáticos durante o processo de secagem, no momento em que o ar aquecido é forçado a cruzar pela massa de grãos. Durante esse processo, a troca de umidade que ocorre entre os grãos é caracterizada como zona de secagem, quando o ar se movimenta no sentido da camada inferior para a superfície da massa do grão (ORO, 1999). Desse modo, é considerado um tipo de secador de baixo custo inicial, apresentando um procedimento simples em que contém uma camada de secagem e uma chapa perfurada por onde passa o ar para a realização do processo de secagem. Esse ar movimenta-se de baixo para cima, gerando a troca de umidade entre os grãos para o processo de secagem. A

maioria dos secadores de leito fixo se apresentam em forma de silos, local utilizado também para a própria armazenagem dos grãos (BALBINOT, 2017).

2.2.2.2 Secadores de fluxo contínuo

Os secadores de fluxo contínuo possuem diferentes modelos e formas de secagem onde podem ser classificados de acordo com o sistema de carga contínua dependendo do modo de escoamento (BALBINOT, 2017; LIMA, 2014; PARK, K. J. et al., 2007; WEBER, 2005).

Esse tipo de secador é chamado de secador de fluxo contínuo porque os grãos passam continuamente pelo secador, ocasionando com que haja pouca resistência à passagem do ar aquecido, enquanto são submetidos a corrente de ar. Estes secadores são muito utilizados e apresentam alto desempenho, mesmo que algumas condições de não homogeneidade da massa resultam na redução da qualidade final do produto (LIMA, 2014; BALBINOT, 2017).

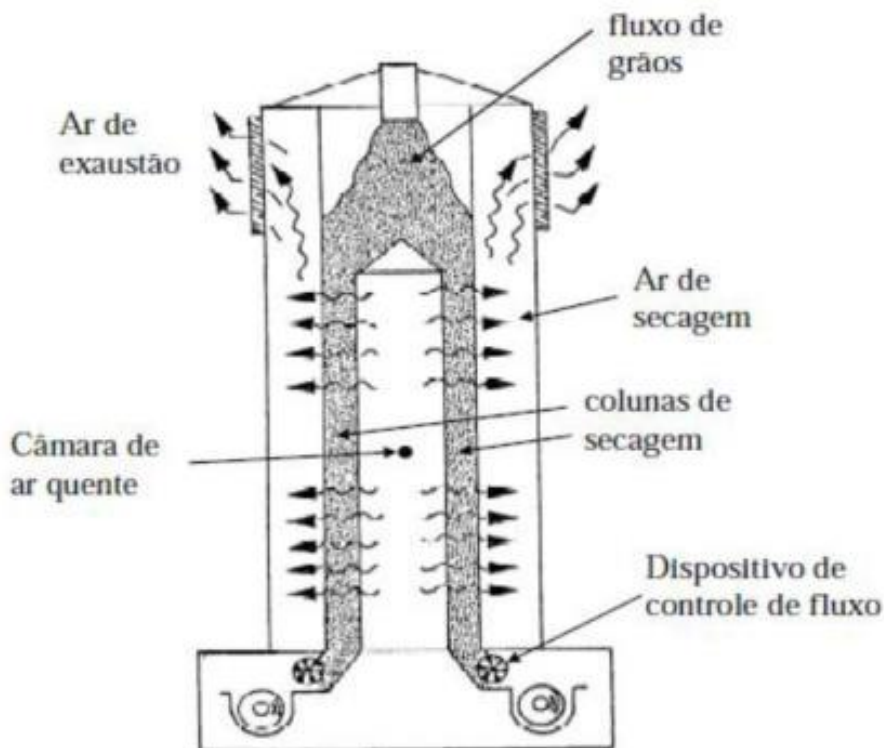
Os tipos de secadores de fluxo contínuo são divididos conforme o modo de escoamento dos grãos (PARK, K. J. et al., 2007). Sabe-se que o fluxo dos grãos ocorre na direção vertical, sendo do alto da torre de secagem para baixo. Porém, o ar utilizado para o processo de secagem e de resfriamento ocorre em diferentes fluxos: cruzado, concorrente, contracorrente e misto (WEBER, 2005).

2.2.2.3 Secador de fluxo cruzado

O secador de fluxo cruzado é caracterizado pela secagem em que o ar passa perpendicularmente em relação a camada de grãos. O custo deste tipo de secador é considerado baixo, pois é de fácil implementação como também simples a realização de sua construção, e bastante utilizado, apesar de que sua eficiência ser menor comparada com os outros modelos de secadores, sendo que não conseguem resultar em uma secagem uniforme da massa de grãos, pois os grãos próximos ao ar de entrada aquecem mais do que estão próximo à saída do ar (ORO, 1999). Além disso, o custo de energia elétrica é alto, e é baixa a eficiência energética (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000).

A Figura 7 demonstra como este secador é caracterizado, considerado um dos modelos de secadores com um baixo custo inicial, além de ser um secador de fácil manusear e operar, assim como possui alta capacidade de secagem (SILVA, 2000; WEBER, 2005).

Figura 7 - Secador de Fluxo Cruzado

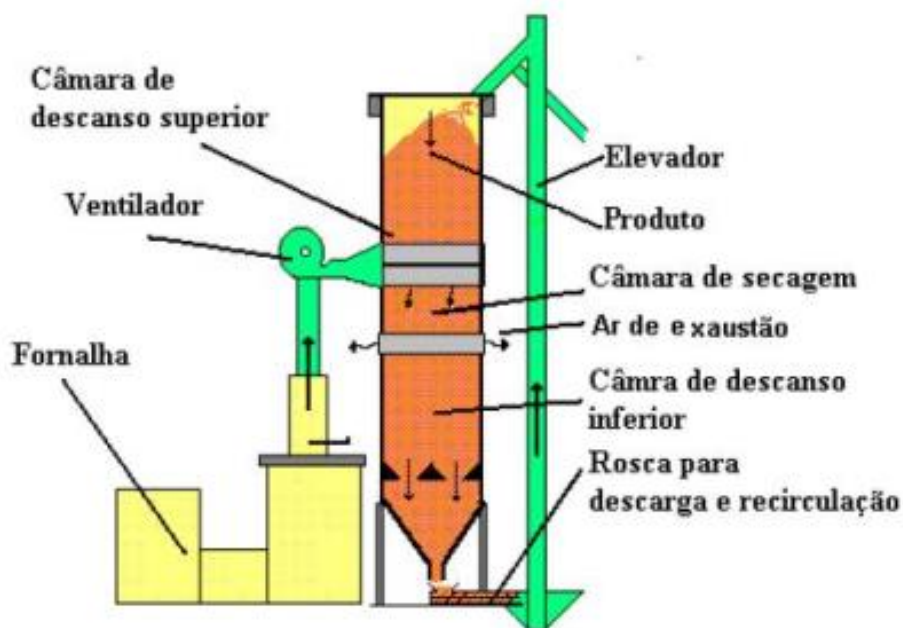


Fonte: BALBINOT, 2007.

2.2.2.4 Secador de fluxo concorrente

Os secadores de fluxo concorrente funcionam de forma que o fluxo do ar e o dos grãos escoam na mesma direção e sentido dentro do secador. É considerado um bom secador pelo resultado dos grãos, com alta qualidade, além da alta eficiência energética no processo de secagem, porém a fabricação do secador requer de custos mais elevados no investimento inicial (SILVA, 2000). Conforme podemos observar na Figura 8.

Figura 8 - Secador de Fluxo Concorrente



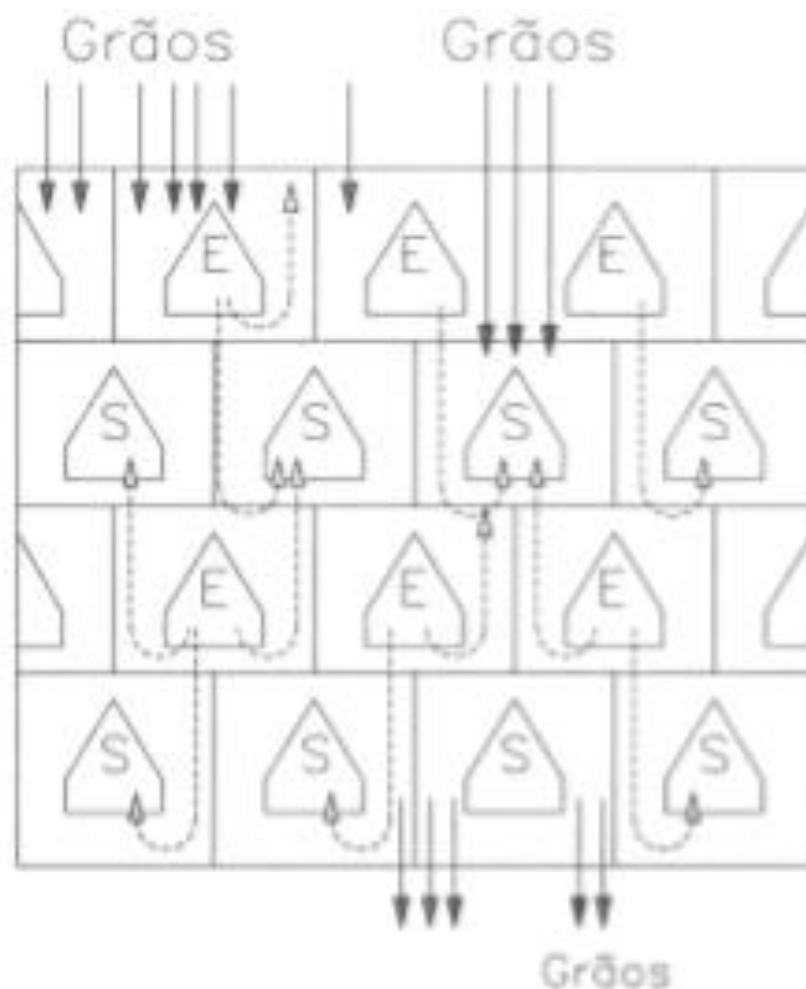
Fonte: BALBINOT, 2007.

2.2.2.5 Secador de fluxo misto

O processo de secagem em secadores de fluxo misto é realizado por uma mistura de fluxos de ar em sentido concorrente, contracorrente e cruzado. Esse tipo de secador é formado por uma série de calhas em forma de “V” invertido dispostas em linhas alternadas ou cruzadas dentro do corpo do secador. Os grãos movem-se para baixo, sob a ação gravitacional e sobre as calhas invertidas. O ar de secagem entra numa linha de calhas e sai nas outras imediatamente adjacentes, superior ou inferior (BIAGI; BERTOL; CARNEIRO, 2002; BORTOLAIA, 2011; BROOKER, 1961).

Conforme mostra a Figura 9, o deslocamento dos grãos ocorre pela ação da gravidade, e o ar é aspirado por ventiladores, através de dutos horizontais (E) e saindo por outros dutos (S) (BIAGI; BERTOL; CARNEIRO, 2002; BORTOLAIA, 2011; BROOKER, 1961).

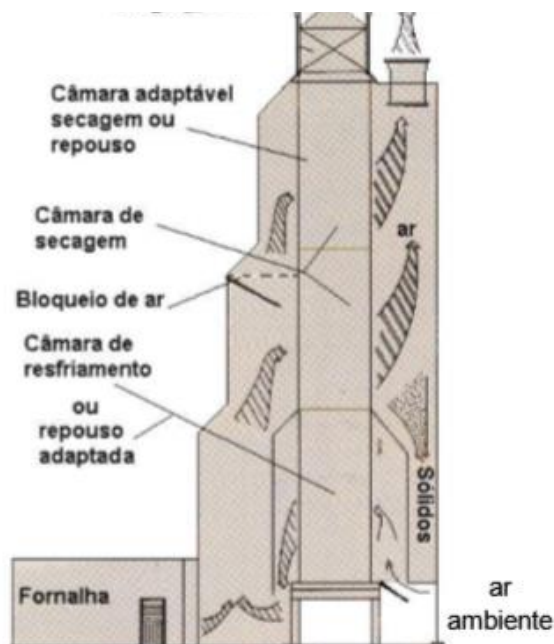
Figura 9 - Diagrama do Fluxo de Ar e Grão no Secador de Fluxo Misto



Fonte: WEBER (2005)

O secador do fluxo misto tipo torre, conforme ilustrado pela Figura 10, é um dos mais utilizados para secar diversas culturas de grãos. Esse tipo de secador é um dos que oferece menos risco de incêndios assim como, permite uma secagem com maior índice de impurezas (OLIVO, 2010; BALBINOT, 2017). Este tipo de secador é reconhecido pela sua alta eficiência energética e à alta capacidade de secagem, porém é um dos secadores que necessitam de um alto custo para implementação.

Figura 10 - Secador de Fluxo Misto



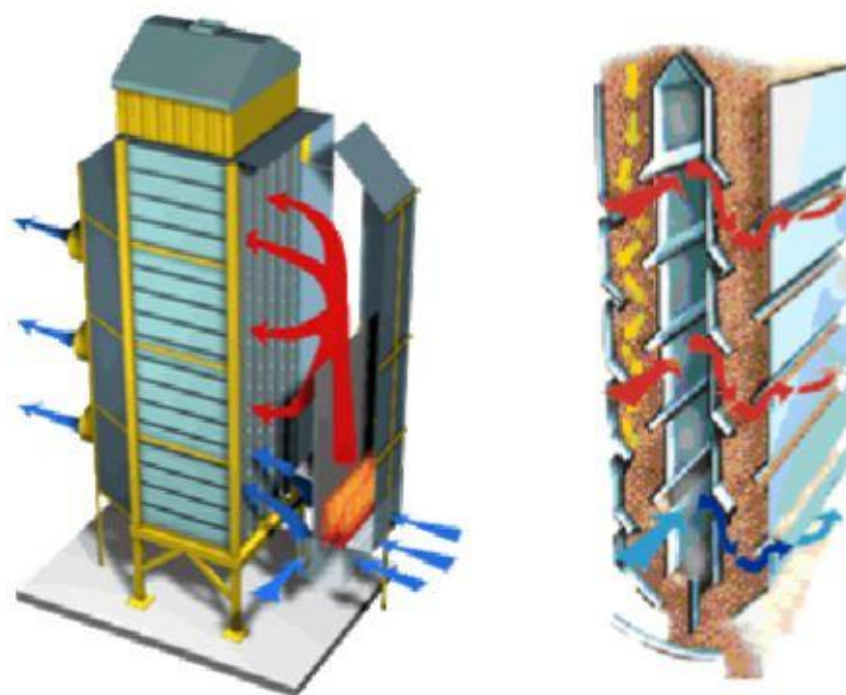
Fonte: SILVA et al. (2000)

O secador de torre de fluxo misto, demonstrado na figura anterior, é dividido em 5 grandes partes, a fornalha, o difusor de entrada do ar quente, a torre de secagem, a qual é subdividida em duas partes, a superior, que correspondendo a $\frac{2}{3}$ da torre é a câmara de secagem de grãos, e a parte inferior da torre de secagem é a câmara de resfriamento dos grãos e o último componente do secador é o difusor de saída do ar (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000).

Além do secador do tipo torre, existem também secadores de fluxo misto intitulados de secadores de leito fixo que os grãos permanecem estáticos durante o processo de secagem, enquanto o ar aquecido passa pela massa dos grãos (ORO, 1999; BALBINOT, 2017).

A Figura 11 demonstra um esquema do secador de coluna de fluxo misto da empresa TMSA e MEGA, as responsáveis pela fabricação do mesmo, o qual tem se tornado um dos melhores secadores, devido a sua eficiência e qualidade final dos grãos. Este secador é o analisado neste trabalho.

Figura 11 - Secador de coluna de fluxo misto



Fonte: Empresa TMSA e Engenharia Mega

Observando a figura, à esquerda, nota-se os fluxos de ar, o ar quente é representado em vermelho, e em azul o ar de resfriamento. À direita o fluxo de ar, aonde perpassa pelos grãos saindo pelos ventiladores. Sendo assim, um sistema eficaz que tem se destacado no mercado nos últimos anos devido a excelente qualidade final dos grãos.

2.3 TRABALHOS RELACIONADOS

Bruce (1984) usou um programa computacional para prever o desempenho de uma série de secadores de fluxo misto, e também para aumentar o valor dos testes em escala completa sob condições cuidadosamente controladas. O trabalho confidencial denotou que a combinação de simulação e teste computacionais, pode ser um dos meios mais econômicos para desenvolver e avaliar o processo de secagem de grãos, neste caso, o de fluxo misto.

O trabalho de Mcfarlane & Bruce (1991) estudaram o desenvolvimento de um projeto de simulação computacional de um secador de fluxo misto bidimensional, através de um

sistema de controle que compreende feedback e termos feedforward que buscam melhorar significativamente sistemas de secadores. Os resultados obtidos foram o melhoramento do desempenho dos controladores, acrescentando novas variáveis no sistema inicial. As simulações do secador com diferentes testes sugeriram que um bom controle foi alcançado, modificando os valores iniciais das variáveis. Concluíram que são necessários mais trabalhos para testar a aplicabilidade geral do algoritmo de controle para diferentes secadores, particularmente quando fatores como a relação de aquecimento para resfriamento ou fluxo não conectado são significativamente diferentes do secador de design, para testar o efeito do ruído do sensor no controle.

Mellmann et al. (2008) estudaram sobre princípios da modelagem matemática para transferência de calor e massa em secadores de fluxo misto. Realizaram experimentos e testes de secagem, através destes dados coletados validaram o modelo em forma quase estacionária. Mais tarde, Mellmann et al (2011), investigaram o fluxo de grãos em secadores de fluxo misto, estudando a distribuição de umidade através de simulações e com auxílio do método de elementos discretos. Foi simulado um domínio 2D que possui metade do tamanho do equipamento de ensaio e 1/4 da dimensão do fluxo. Um dos problemas das simplificações é que tempos de fluxo não podem ser comparados diretamente entre experimento e simulação. Desta forma, os autores tiveram de transformar as coordenadas em variáveis adimensionais. Os resultados permitiram compreender características importantes do fluxo dos grãos, apresentando concordância entre simulação e experimento. Assim, a simulação foi apresentada como uma ferramenta para melhorar o design mecânico de dutos de entrada e também foi validado por auxiliar o sistema.

Weigler et al. (2012), realizaram simulações e experimentos com secadores de fluxo misto para verificar o fluxo de ar através da cama de grãos, o comportamento dos grãos e a velocidade das partículas em 2D. Perceberam através do estudo que no centro do secador a velocidade é mais elevada, já nas laterais a velocidade é menor, isso devido ao atrito da parede. Esse efeito das paredes leva a distribuição de umidade não uniforme, já que as velocidades das partículas são diferentes. Através dos resultados obtidos com este estudo os autores elaboraram um novo modelo de secador, onde o mesmo inclui fluxo cruzado, com intuito de aumentar a eficiência do ar e a velocidade de secagem, assim como reduzir os gastos com energia.

Em Lima (2014), investiga o fluxo de grãos de soja em um secador de fluxo misto, e utiliza como ferramenta auxiliar o MED. O autor baseou-se na literatura para utilizar as propriedades dos materiais utilizados nas simulações, o mesmo utilizou uma plataforma experimental para a realização dos experimentos, os quais foram replicados no domínio de

simulação. Os resultados apresentados pelo autor apontam que os grãos que tocam as paredes ou calhas sofrem com a ação do atrito, modificando assim a velocidade do escoamento dos grãos provocando um efeito de não uniformidade, assim como considerou que o software Yade modelou corretamente o fluxo de soja sendo uma ótima ferramenta para auxiliar esse processo. Também concluiu que os resultados obtidos através das simulações concordam com os experimentos realizados, não apenas sobre o tempo de descarga, mas também sobre os padrões de escoamento da massa de grãos ao longo do processo de descarga.

Faoro (2014) apresentou a modelagem matemática e a simulação tridimensional do fluxo de ar em armazéns graneleiros de um sistema real com condições não uniformes e anisotrópicas da massa de grãos. A pesquisa utilizou o Método dos Elementos Finitos gerando uma matriz de equações algébricas lineares, e a coleta dos dados experimentais foi realizada através de instrumentos de medição que forneceram informações sobre o processo do sistema de aeração em armazéns graneleiros. Através da simulação foi possível obter valores da pressão em cada ponto do domínio, assim como em diferentes profundidades, utilizando o software TetGen para a construção de geometrias 3D. Já mediante às simulações numéricas do fluxo de ar em armazéns, com a massa de grãos não homogênea e não uniforme, providas de um sistema real da armazenagem, foram obtidos vários resultados, entre eles a verificação de áreas de risco operacional do sistema de armazenamento investigado. É válido citar que a autora constatou a necessidade da implementação de um sistema de aeração mais abrangente nas laterais do armazém investigado, diminuindo domínios inadequados para a armazenagem. Contudo, constata-se que validou-se o modelo matemático proposto através de dados experimentais, obtidos de um sistema real.

Jokiniemi et al. (2014) estudaram um modo de economizar energia elétrica durante o processo de secagem em um secador de fluxo misto, perceberam que através do controle do fluxo do ar e o da temperatura melhora o desempenho do secador e economiza energia, mas que essas vantagens vão depender do tipo de grão bem como, de sua umidade. Explicam ser um sistema de controle que usa a temperatura do ar de secagem, a umidade do ar de exaustão e a temperatura do grão como fatores de controle para ajustar o fluxo de ar durante o processo de secagem, tecnicamente seria simples e barato para instalar em novos secadores, os quais deve-se obter o tipo de grão e o teor de umidade inicial como dados de entrada, onde a regulação vai depender da taxa de liberação de umidade de cada tipo de grão.

Jokiniemi et al. (2016) apresentaram um sistema com um microcontrolador simples baseado em um controlador contínuo do fluxo do ar em um secador de recirculação, desenvolveram os testes em uma secadora de pesquisa reduzida. Obtiveram um sistema de

medição para observar os processos de temperaturas e umidade do ar, bem como a taxa de fluxo de ar. Regularam o equipamento de forma que à medida que o fluxo de ar diminuía elevavam a temperatura, sendo um limite estabelecido de 90° para evitar danos nos grãos causados pelo calor. O controlador operava como projetado, reduzindo suavemente a taxa de fluxo de ar e aumentando a temperatura do ar de secagem simultaneamente. Tornando-se ativo, começando a aumentar o fluxo de ar. A ideia era aumentar a umidade relativa do ar de exaustão, já que a baixa umidade relativa do ar é considerada como a perda no uso de energia. Com o fluxo de ar reduzido, a água no grão tem mais tempo para difundir para a superfície dos grãos e evaporar. Os resultados indicaram que o controle do sistema melhorou a eficiência energética e o desempenho do secador, porém a variação nos resultados foi grande.

Oksanen (2017) realizou um estudo envolvendo fluxo do ar em secadores de fluxo misto, com camada dupla. Ou seja, uma das camadas do secador, alternadamente é fechada podendo ser de saída ou de entrada do ar. Esse modo de camada dupla faz com que aumente a contrapressão do ar, reduzindo o fluxo, assim fazendo com que o ar tenha mais tempo na passagem pelos grãos, sendo a distância maior e a velocidade menor. Através de simulações computacionais o autor percebeu que o modo de camada dupla afeta o fluxo de ar, assim como, quanto mais longa a rota do fluxo de ar, a contrapressão aumenta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada, abordando um estudo de intervenção sobre o material de estudo, descrevendo detalhadamente o estudo experimental da análise de seu funcionamento. Com isso, tem-se como objetivo analisar a aeração de um sistema real de secagem de grãos, as quais são descritos os detalhes da simulação 3D do sistema de aeração e o modelo matemático implementado no processo, por meio do Método dos Elementos Finitos.

3.1 ESTUDO EXPERIMENTAL

A coleta dos dados experimentais foi realizada através de instrumentos de medição que forneceram informações sobre o processo do sistema de aeração em secadores de fluxo misto, gerando assim um conjunto de resultados experimentais.

3.1.1 SISTEMA REAL DE SECAGEM DE GRÃOS

O procedimento metodológico adotado nesta pesquisa, para atingir o objetivo de simular o fluxo de ar em secadores de fluxo misto em um sistema real, é de caráter qualitativo e quantitativo. O secador pesquisado utilizado no procedimento pertence a empresa de sementes Cambaí. A coleta de informações (Tabela 7) foi realizada para obtenção de informações sobre o arranjo das entradas e saídas do ar, e para medidas de velocidade e pressão nessas entradas e saídas.

Tabela 7 - Informações do secador investigado

Dados da Cooperativa:	
Tipo do grão	Trigo
Tipo de secador	TC80 da Mega – TMSA
Volume de grãos	42000 Kg
Temperatura	30°C – 55°C
Quantidade de ciclos	Máximo 4
Tempo	4 horas

Fonte: Autor

O sistema de aeração do secador investigado consiste em uma entrada de ar que vem da fornalha, Figura 12(a), misturada com uma entrada de ar ambiente o qual é regulado pelo operador do secador. Há na saída três ventiladores que sugam o ar, conforme Figura 12(b), que tem a finalidade de remover o ar carregado de umidade, circulando no interior do secador entre a massa dos grãos.

Figura 12(a) - Fornalha



Fonte: Autor

Figura 12(b) - Ventiladores



Fonte: Autor

Em secadores de fluxo misto, o ar cruza na massa porosa dos grãos em ziguezague, o ar entra da fornalha misturada com o ar ambiente e é levado direto para o interior do secador, aonde através do fluxo do ar é forçado a passar na massa porosa dos grãos, saindo do outro lado sugado por ventiladores. O secador investigado possui três ventiladores, que além de abstrair o ar com a umidade dos grãos, é eficiente na captação de pó e particulados.

O fluxo dos grãos que desce pelas calhas (Figura 13) oferece baixa resistência ao fluxo do ar., o qual, permite reduzir o consumo de energia, mantendo um grande volume de fluxo específico. Evita quebra do grão e tem requisitos mínimos de manutenção. A massa de grãos desce em ziguezague dentro da coluna e uma corrente de ar seco e quente rodeia o grão de maneira uniforme quando o mesmo realiza seu movimento de rotação. O ar potencializa a transmissão de energia e absorve a umidade. Como resultado desse funcionamento eficaz, há aumento no desempenho por tonelada de grão em processo (TMSA; MEGA).

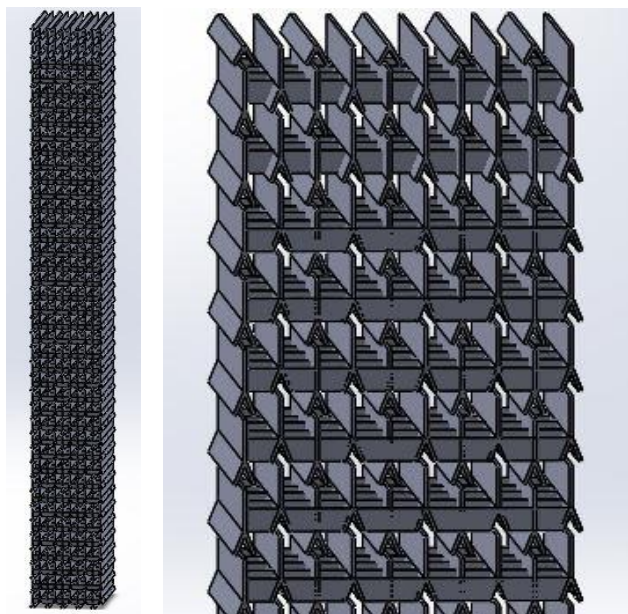
Figura 13 - Calhas do secador investigado (visão superior)



Fonte: Autor

O secador é formado por várias calhas, distribuídas em linhas paralelas, localizadas dentro do secador (Figura 14). O deslocamento dos grãos ocorre pela ação da gravidade. O ar de secagem possui três sentidos: para cima (sistema contracorrente), para baixo (sistema concorrente) e horizontal (sistema cruzado).

Figura 14 - Estrutura do secador investigado



Fonte: Autor

3.1.2 PROCESSO EXPERIMENTAL

A coleta dos dados experimentais foi realizada por meio de instrumentos adequados de alta precisão, os quais forneceram informações sobre a entrada e saída do ar no secador. A medição da pressão estática do ar e da velocidade de entrada e saída do ar foi realizada em 18 pontos. Através de um anemômetro adequado para medições da velocidade do ar com boa precisão (Figura 15), foram realizadas as coletas da velocidade do ar de saída logo após o caimento dos grãos. Para a medição da pressão da entrada do ar, foi adotado o manômetro (Figura 16), indicado para pressões mais altas de ar.

Figura 15 - Coleta dos dados através do anemômetro



Fonte: Autor

Figura 16 - Coleta da pressão através do manômetro



Fonte: Autor

3.2 MODELO MATEMÁTICO

A modelagem matemática é uma ferramenta utilizada para resolução de um grande número de problemas. Por conseguinte, pode ser entendida, como uma busca por sintetizar ideias concebidas através de situações empíricas que estão quase sempre, escondidas em um emaranhado de variáveis (BASSANEZI, 1994).

Nesta etapa, é apresentado o modelo matemático aplicado no presente trabalho, descrito por Equações Diferenciais Parciais.

Em vista disto, a solução do sistema da distribuição de pressão e velocidade em cada ponto do domínio de integração é representada na forma de uma função vetor $w=f(\text{grad}P)$, em que os componentes u , v e w da velocidade V e P são variáveis primitivas do sistema inicial. Contudo, a relação entre a velocidade e o gradiente de pressão é diferente para cada tipo de grão. Essa diferença é causada por fatores que provocam variação da resistência ao fluxo de ar, na forma geométrica das partículas, entre outros fatores.

Portanto, Khatchatourian e Savicki (2004) propuseram a fórmula que descreve o fluxo de ar em meio particulado, para as três condições do fluxo, consistindo em um sistema de duas equações:

$$\text{div } V = 0 \quad (3.1)$$

$$V = -\frac{\text{grad}P}{|\text{grad}P|} \exp\left(\left\{\ln(1+U^2) - 2U \arctan(U)\right\}/\pi + 3U\right)/4a + C \quad (3.2)$$

onde $U(P)=a \ln(|\text{grad}P|)+b$ é um argumento intermediário; $a>0$ e b são constantes; a e b precisam ser definidos experimentalmente; C é a constante de integração.

Quando $|\text{grad}P| \rightarrow 0$, $U \rightarrow -\infty$, $\lim_{U \rightarrow -\infty} (3/4 - \arctan(U)/2\pi) = 1$, correspondente ao fluxo laminar; e quando $|\text{grad}P| \rightarrow \infty$, $U \rightarrow \infty$, $\lim_{U \rightarrow \infty} (3/4 - \arctan(U)/2\pi) = 0.5$, correspondente ao fluxo turbulento.

A equação expressa que o vetor velocidade e o gradiente de pressão são colineares em todos os pontos do domínio do fluxo de ar, e que a razão dos módulos desses vetores é função do gradiente de pressão.

A proporcionalidade é expressa pelo coeficiente k por:

$$k = \exp\left(\left\{\left[\ln(1+U^2) - 2U \arctan(U)\right]/\pi + 3U\right\}/4a + C\right)/|\text{grad}P| \quad (3.3)$$

Para um meio isotrópico não homogêneo $K = K(x, y, z)$ é escalar. Empregando a equação (3.2), os componentes da velocidade u , v e w para o caso tridimensional podem ser expressos na forma:

$$u = -k_x \frac{\partial P}{\partial x}; v = -k_y \frac{\partial P}{\partial y}; w = -k_z \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3.4)$$

onde a coordenada y em metros corresponde à direção vertical, as coordenadas x e z estão localizadas no plano correspondente ao fundo do secador.

Substituindo a equação (3.4) na equação (3.1), a equação diferencial parcial não linear tridimensional é obtida:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-k_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.5)$$

Considerando o problema, tem-se as seguintes condições de contorno:

$$P = P_e \text{ (entrada e saída de ar - Condição de Dirichlet)} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{n} \cdot \text{grad} P = 0 \text{ (paredes - Condição de Neumann)} \quad (3.7)$$

onde P_e é a pressão na entrada e saída de ar em Pa e $\mathbf{n}$ é o vetor unitário normal à superfície da parede do secador.

Portanto, a distribuição de pressão e velocidade do fluxo do ar no estado permanente em um domínio tridimensional da massa de grão são descritos pelas equações (3.3), (3.4) e (3.5) usando as condições de contorno (3.6) e (3.7).

3.2.1 AVALIAÇÃO DE AERAÇÃO

A análise do campo de velocidade não é suficiente para avaliar a aeração, pois, regiões onde o fluxo de ar percorre uma grande camada de produto, precisam de maior pressão e velocidade do ar, sendo assim, em regiões onde o fluxo percorre uma camada menor do produto, precisam de uma velocidade menor, como também, se a velocidade do ar foi muito alta pode provocar uma secagem excessiva do produto.

Contudo, a vazão específica do ar, serve para avaliar a eficiência do sistema de aeração em secadores, com diferente distribuição de ar, no qual será utilizado o critério criado por Khatchatourian e Binelo (2008) chamado de vazão específica local, definido por:

$$q = \frac{Q_a}{m_g} = \frac{W_a S}{\rho_g h S} = \frac{W_a}{\rho_g h} \quad (3.8)$$

Onde q é o volume da vazão específica do ar;

Q_a é a vazão específica total de ar em $m^3 s^{-1}$;

m_g é a massa total de produto em kg;

W_a é a velocidade do ar em ms^{-1} ;

ρ_a é a densidade do produto em $kg m^{-3}s^{-1}$;

S é a área de seção transversal em m^2 ; h é a altura da massa de grãos em m.

De acordo com Khatchatourian e Binelo (2008), a vazão específica local para armazéns com área de seção transversal variável para qualquer ponto interno da malha $X=X(x,y,z)$, pode ser representada como:

$$q(X) = \frac{W(X)}{\rho(X)L_x} \quad (3.9)$$

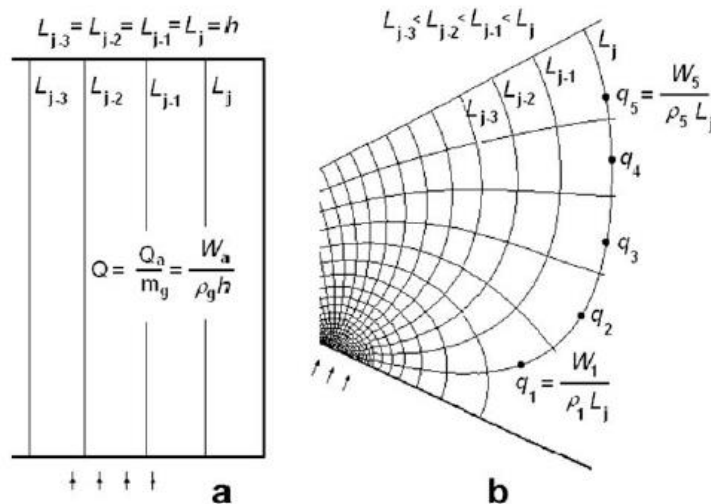
Onde $q(X)$ é a vazão de ar específica local no ponto $X(x,y,z)$ em $m^3s^{-1} kg^{-1}$;

$W(X)$ é a velocidade do ar no ponto X em ms^{-1} ;

$\rho(X)$ é a densidade da massa de grãos no ponto X em $kg m^{-3}s^{-1}$;

L_x é o comprimento total em m da trajetória de ar que passa pelo ponto X .

Figura 17 - Vazão específica local



Fonte: Khatchatourian e Binelo (2008)

O método consiste na velocidade de ar em cada ponto, dividido pela densidade do produto nesse mesmo ponto e pela trajetória do ar até o momento. A vazão específica local, multiplicada pelo tempo de aeração, permite avaliar a qualidade da aeração em qualquer ponto

do produto, mesmo se a aeração é feita separadamente para cada entrada e em intervalos de tempo diferentes.

Khatchatourian e Binelo (2008) avaliaram o sistema de aeração quando a aeração é feita separadamente em cada entrada de ar do armazém, e com períodos de tempo variados de aeração em cada entrada, escolhendo a vazão específica do ar igual a $9\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{t}^{-1}$. Dessa forma, utilizaram a vazão específica local como parâmetro para avaliar a eficiência do sistema de aeração. Neste caso, a vazão específica local resultante q_L em cada ponto do armazém pode ser calculada através da expressão:

$$q_L = \frac{\sum_{i=1}^n t_i q_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (3.10)$$

Onde q_i é a vazão específica local correspondente à aeração com apenas uma entrada (estágio de aeração i);

t_i é o tempo de aeração com apenas uma entrada (i);

n é o número total de entradas;

i é o número do estágio de aeração correspondente a entrada.

3.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta numérica importante para resolver Equações Diferenciais Parciais, usado para sistemas mais complexos envolvendo geometrias e condições de contorno mais sofisticadas.

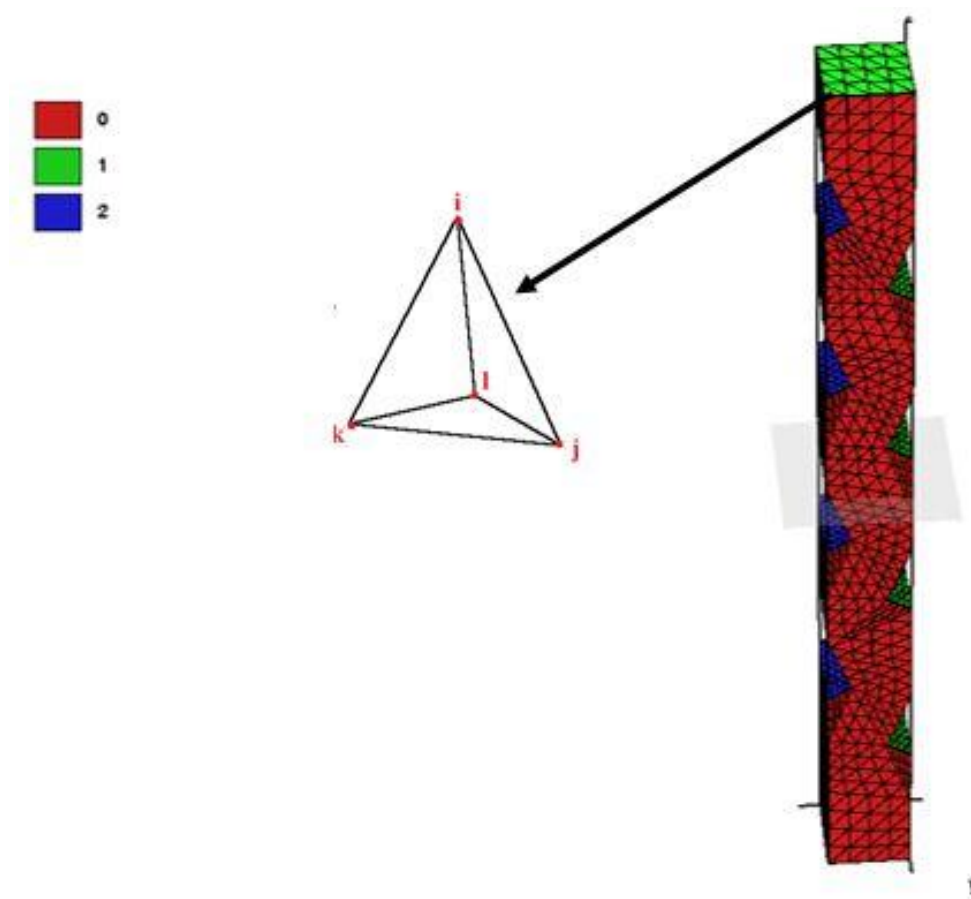
O desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos teve sua origem nos séculos XVIII e XIX, e em sua configuração atual resulta da confluência de desenvolvimentos na mecânica, matemática, análise numérica e computação.

Conforme, ASSAN (1999), o MEF consiste em transformar o sólido contínuo em uma associação de elementos discretos e escrever as equações de compatibilidade e equilíbrio entre eles, mas admitir funções contínuas que representam, por exemplo, o campo de deslocamento no domínio de um elemento e, a partir daí, obter o estado de deformação correspondente que, associado às relações constitutivas do material, permitem definir o estado de tensões em todo o elemento.

DEVILLA et al. (2005), argumenta que a técnica de elementos finitos pode ser utilizada como uma ferramenta importante na determinação da distribuição do ar providos de sistema de aeração.

No caso tridimensional, o campo de integração, que é a massa de grãos, é dividido em tetraedros (volume de quatro pontos, seis arestas e quarta faces), cujos vértices i, j, k, l são chamados de nós. A geração da malha (Figura 18), ilustra um exemplo da geometria da calha do secador, dividido em tetraedros.

Figura 18 - Representação dos tetraedros, e seus respectivos vértices, que formam a geometria



Fonte: Autor

Consideram-se os valores de pressão nos nós P_i, P_j, P_k, P_l conhecidos e escolhendo uma função linear para a aproximação dos valores da pressão nos pontos internos de cada elemento (equação 3.11):

Funções de primeiro grau em sua discretização:

$$P = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \quad (3.11)$$

Abrindo a equação (3.11), tem-se:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & x & y & z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Aplicando os elementos finitos na forma de tetraedros tem-se

$$P = [N]\{P\} \quad (3.13)$$

$$\text{Onde } [N] = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k & N_l \end{bmatrix} \text{ e } \{P\} = \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \\ P_l \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Substituindo $P_i; P_j; P_k; P_l$ em (3.12) temos:

$$\begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \\ P_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

$$\text{Onde: } C = \begin{pmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{pmatrix}. \quad (\text{matriz das coordenadas dos v\u00e9rtices})$$

Ent\u00e3o:

$$\begin{aligned} P &= C.\alpha \\ C^{-1}P &= C^{-1}C.\alpha \\ \alpha &= C^{-1}P \end{aligned} \quad (3.16)$$

Isolando α temos:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{pmatrix} = C^{-1} \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \\ P_l \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Substituir (3.17) em (3.12)

$$P = (1 \ x \ y \ z) \ C^{-1} \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \\ P_l \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Para um número de elemento finito, sendo i, j, k e l, quatro pontos do espaço, não situados num mesmo plano, as arestas do paralelepípedo são determinadas pelos vetores $\vec{ij}$, $\vec{ik}$ e $\vec{il}$ e, portanto, o volume do tetraedro ijkl é:

$$V = \frac{1}{6} \left| \left(\vec{ij}, \vec{ik}, \vec{il} \right) \right|$$

$$P = (1 \ x \ y \ z) \frac{1}{6 \det(C)} \cdot \begin{pmatrix} C_{11} & C_{21} & C_{31} & C_{41} \\ C_{12} & C_{22} & C_{32} & C_{42} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{43} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \\ P_l \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Onde C_{ij} são cofatores desta matriz C.

De onde:

$$P = [N] \{P\}$$

$$N = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k & N_l \end{bmatrix} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k & N_l \end{bmatrix}} \right\} \text{ funções de forma}$$

$$\begin{aligned}
 N_i &= (1 \quad x \quad y \quad z) \cdot \frac{1}{6 \det(C)} \cdot \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \end{pmatrix} \\
 N_j &= (1 \quad x \quad y \quad z) \cdot \frac{1}{6 \det(C)} \cdot \begin{pmatrix} C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \\ C_{24} \end{pmatrix} \\
 N_k &= (1 \quad x \quad y \quad z) \cdot \frac{1}{6 \det(C)} \cdot \begin{pmatrix} C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \\ C_{34} \end{pmatrix}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} N_i \\ N_j \\ N_k \end{aligned}} \right\} \text{Funções de forma em cada nó} \quad (3.20)$$

Derivando (3.20):

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial[N]}{\partial x} &= \frac{1}{6 \det(C)} [C_{12} \quad C_{22} \quad C_{32}] \\
 \frac{\partial[N]}{\partial y} &= \frac{1}{6 \det(C)} [C_{13} \quad C_{23} \quad C_{33}] \\
 \frac{\partial[N]}{\partial z} &= \frac{1}{6 \det(C)} [C_{14} \quad C_{24} \quad C_{34}]
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} \frac{\partial[N]}{\partial x} \\ \frac{\partial[N]}{\partial y} \\ \frac{\partial[N]}{\partial z} \end{aligned}} \right\} \text{Derivada das funções de forma em cada nó} \quad (3.21)$$

Portanto:

$$\begin{aligned}
 &\frac{\partial N}{\partial x} \\
 &\frac{\partial N}{\partial y} \\
 &\frac{\partial N}{\partial z}
 \end{aligned}
 = \frac{1}{6 \det(C)} \cdot \begin{pmatrix} C_{12} & C_{22} & C_{32} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

Onde:

$$\frac{1}{6 \det(C)} \cdot \begin{pmatrix} C_{12} & C_{22} & C_{32} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} \end{pmatrix} = B \quad (3.23)$$

Então:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{aligned} = \mathbf{B} \cdot \{P\} \quad (3.24)$$

O método de Garlekin é um método aproximado de resíduos, utilizando Equações Diferenciais e condições de contorno do sistema físico. É o que melhor se adapta à formulação do Método dos Elementos Finitos. No entanto, usando Garlekin, tem-se:

$$\iiint [N]^T \left[-\varepsilon k_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \varepsilon k_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} - \varepsilon k_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right] dV = 0 \quad (3.25)$$

Reduzindo o problema para derivada de primeiro grau, utilizando a identidade:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \varepsilon k_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \varepsilon k_x \frac{\partial P}{\partial x} + [N]^T \left(\varepsilon k_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \quad (3.26)$$

De onde:

$$[N]^T \left(\varepsilon k_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \varepsilon k_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \varepsilon k_x \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3.27)$$

Da mesma forma para o y:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \varepsilon k_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \varepsilon k_y \frac{\partial P}{\partial y} + [N]^T \left(\varepsilon k_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \quad (3.28)$$

De onde:

$$[N]^T \left(\varepsilon k_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \varepsilon k_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \varepsilon k_y \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3.29)$$

Igualmente para o z:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left([N]^T \varepsilon k_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \varepsilon k_z \frac{\partial P}{\partial z} + [N]^T \left(\varepsilon k_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (3.30)$$

De onde:

$$[N]^t \left(\varepsilon \mathbf{k}_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left([N]^T \varepsilon \mathbf{k}_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) - \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \varepsilon \mathbf{k}_z \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3.31)$$

Permutando as equações (3.27), (3.29) e (3.31), na equação (3.25), tem-se:

$$\begin{aligned} & \iiint [N]^T \left[-\varepsilon \mathbf{k}_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \varepsilon \mathbf{k}_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \varepsilon \mathbf{k}_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right] dV = \\ & \iiint \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(-[N]^T \varepsilon \mathbf{k}_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-[N]^T \varepsilon \mathbf{k}_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-[N]^T \varepsilon \mathbf{k}_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right\} dV \\ & - \iiint \left\{ -\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \varepsilon \mathbf{k}_x \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \varepsilon \mathbf{k}_y \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \varepsilon \mathbf{k}_z \frac{\partial P}{\partial z} \right\} dV = 0 \end{aligned} \quad (3.32)$$

Aplicando a fórmula de Ostrogradsky:

$$\iint_S \vec{F} d\vec{S} = \iiint_V (\text{div} \vec{F}) dV$$

Tem-se:

$$\begin{aligned} & \iint_S \vec{n} \left\{ \left([N]^T \varepsilon \mathbf{k}_x \frac{\partial P}{\partial x} \right)_i + \left([N]^T \varepsilon \mathbf{k}_y \frac{\partial P}{\partial y} \right)_j + \left([N]^T \varepsilon \mathbf{k}_z \frac{\partial P}{\partial z} \right)_k \right\} dS \\ & - \iiint_V \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \varepsilon \mathbf{k}_x \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \varepsilon \mathbf{k}_y \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \varepsilon \mathbf{k}_z \frac{\partial P}{\partial z} \right\} dV = 0 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Sabendo que:

$$\text{grad} P = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{pmatrix}$$

$$\iint_S ([N]^T \varepsilon \mathbf{K} \vec{n} \text{grad} P) dS$$

$$-\iiint_V \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \varepsilon \mathbf{k}_x \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \varepsilon \mathbf{k}_y \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \varepsilon \mathbf{k}_z \frac{\partial P}{\partial z} \right\} dV = 0 \quad (3.34)$$

$$\iint_V [B]^t \cdot [B] \{P\} \cdot dV = B^t [B] \cdot \iint_V dV \cdot \{P\} = V_{tetraedro} \cdot B^t \cdot B \cdot \{P\} \quad (3.35)$$

$$\text{As condições de fronteira na parede são: } \frac{\partial P}{\partial n} = \vec{n} \cdot \text{grad } P = 0 \quad (3.36)$$

$$\text{Então:} \quad \iint ([N]^T \varepsilon \mathbf{K} \vec{n} \text{grad } P) dS = 0 \quad (3.37)$$

A partir disto, é possível perceber a importância do MEF para resolver Equações Diferenciais Parciais, podendo ser usado para sistemas mais complexos envolvendo geometrias e condições de contorno mais sofisticadas.

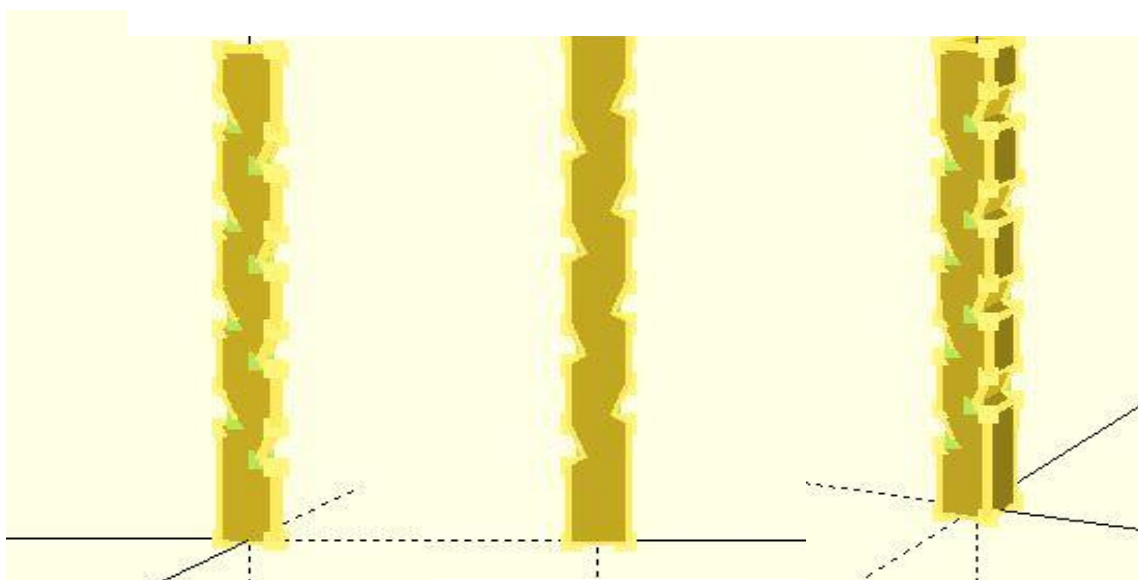
3.4 PROGRAMAS E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

3.4.1 DESENVOLVIMENTO DA GEOMETRIA

O Método dos Elementos Finitos é um método matemático para a solução de Equações Diferenciais Parciais, com o objetivo principal de aumentar a precisão de projetos, por esse motivo que o mesmo foi utilizado neste trabalho. Além do mais, a utilização vem avançando desde a década de 80, quando se tornou mais popular, a partir do avanço tecnológico dos computadores e dos vários métodos de geração automática de malhas.

Para a aplicação do Método dos Elementos Finitos é necessário o estabelecimento de um domínio de integração, no caso tridimensional, esse domínio precisa ser um sólido. Essa informação do sólido é transmitida ao gerador de malha que irá então decompor o sólido em elementos menores. No caso deste trabalho, em tetraedros. Na etapa da criação do sólido, utilizando OpenScad, que é um software livre para criação de objetos tridimensionais, possui uma linguagem própria, pode gerar arquivos para formato de impressora 3D, reconhece (.slt). Neste trabalho foi utilizado o software para desenhar o sólido desejado, para posteriormente ser definidas as diferentes regiões da superfície do domínio que terão diferentes condições de contorno (Figura 19).

Figura 19 - Fluxograma do gerador de malha da massa de grãos



Fonte: Autor

Após gerar a geometria da calha do secador no OpenScad e salvar em formato stl, é exportado para o TetGen para criar a malha e estabelecer as condições de contorno.

3.4.2 ELABORAÇÃO DA MALHA COM O TETGEN

Depois de gerada a superfície do volume de integração, é necessário decompor esse volume em elementos volumétricos menores, para que possa ser aplicado o método dos elementos finitos. A malha utilizada neste trabalho foi de tetraedros.

O software utilizado para a construção de geometrias 3D foi o TetGen, criado por Hang Si Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics, em Berlin, Alemanha. O TetGen gera a geometria, como também subdivide em tetraedros utilizando algoritmos Delaunay, quando maximiza o menor ângulo de todo triângulo, evitando triângulo com ângulos muito pequenos.

Esta subdivisão consiste na qualidade da malha tetraédrica. Parâmetros são usados para controlar o comportamento de TetGen e para especificar a saída de arquivos. Este possui também um bom sistema de refinamento local da malha. Isto é feito da seguinte forma: após gerada a malha inicial, é possível refiná-la localmente, informando como entrada para o TetGen o arquivo da malha original e mais um arquivo indicando em cada tetraedro da malha original qual seu volume máximo. Esse parâmetro de volume máximo vai ser utilizado no refinamento, o sistema irá subdividir o tetraedro recursivamente até que nenhum tetraedro resultante da subdivisão possua volume maior do que indicado naquele ponto.

O software TetGen é um poderoso aliado em modelos matemáticos, pois seu refinamento e discretização da geometria são adequados na implementação do Método dos Elementos Finitos, em 3D. A exatidão do método dos elementos finitos depende de vários fatores, dentre eles o número de elementos da malha. Quanto mais elementos possuem a malha, mais fina dizemos que ela se constitui, implicando maior esforço computacional, tanto em processamento, quanto em memória. Refinar a malha, portanto, é aumentar o número de elementos esperando com isso melhorar a exatidão do cálculo.

3.4.3 RESOLVEDOR DO SISTEMA

O resolvidor do sistema é o componente que aplica o Método dos Elementos Finitos gerando uma matriz de equações algébricas lineares. O sistema é então resolvido numericamente para que seja obtida uma solução aproximada para o sistema.

O resolvidor foi desenvolvido em linguagem C++, na plataforma Visual Studio, que além de alta portabilidade, possui excelente desempenho e controle preciso da memória utilizada pelo sistema. A etapa inicial do sistema é carregar as informações das condições de contorno do problema e a malha de elementos finitos. As condições de contorno são definidas pelo usuário. As faces e vértices estão associadas as estruturas que representam as condições de contorno. O resolvidor utilizado é uma versão adaptada do resolvidor desenvolvido por Khatchatourian e Binelo (2008) inicialmente aplicado na solução do problema do fluxo de ar em armazéns, e neste trabalho aplicado para o fluxo de ar em secadores.

3.4.4 PÓS-PROCESSAMENTO

O pós-processamento é uma etapa importante do trabalho para que se possa fazer uma avaliação eficiente dos resultados providos do modelo matemático. Para esta etapa foi utilizado o programa Paraview, um software livre que possui ferramentas poderosas para análise dos resultados, tais como superfícies isométricas, linhas de fluxo, vetores de direção, campos de seleção, animação, entre outros. Para que esse programa pudesse ser utilizado para avaliação dos resultados desse trabalho, foi escrito um componente para o resolvidor que exporta os resultados para o formato VTK, aceito como entrada pelo Paraview.

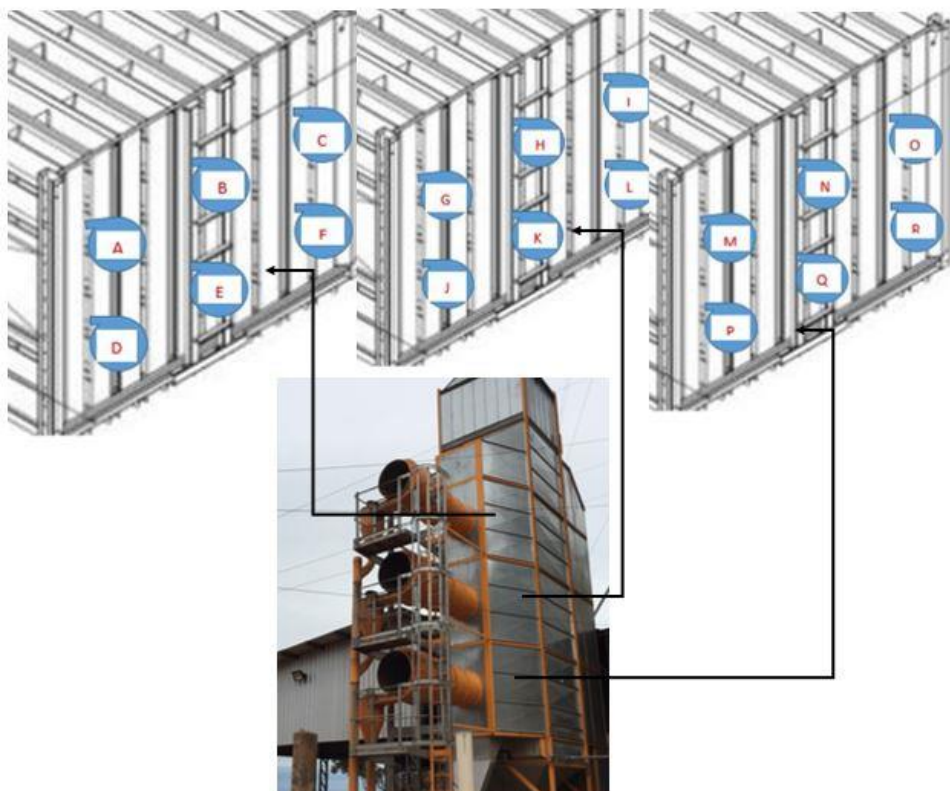
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação é realizada com intuito de representar matematicamente uma situação real. Para organizar um modelo de simulação, os fenômenos físicos e químicos do processo são analisados e sua idealização é representada através de equações matemáticas. Estabelece-se as condições de entrada com intuito de verificar a validação do modelo. Sendo assim, neste capítulo são demonstrados os resultados experimentais coletados de um sistema de secagem real e os resultados simulados providos do modelo matemático. Assim, realizando a comparação entre os resultados reais e simulados.

4.1 RESULTADO EXPERIMENTAL

A coleta dos dados experimentais foi realizada através de instrumentos de medição que forneceram informações sobre o processo do sistema de aeração do secador, o anemômetro. A medição da velocidade do ar na saída da massa dos grãos de trigo foi realizada em 18 pontos (Figura 20), em três dutos de saída do ar.⁷

Figura 20 - Pontos da coleta experimental da velocidade do ar logo após a massa de grãos



Fonte: Autor

Após a coleta de dados, esses consistem nos resultados experimentais os quais representam o comportamento dos valores da velocidade do ar (Tabelas 8), assim como também coletada pressão estática observada no processo.

Tabela 8 - Resultados experimentais da velocidade do ar

Indicadores	Entrada do ar		Saída do ar	
	Temperatura	Velocidade (m/s)	Temperatura	Velocidade (m/s)
A	37,75 °C	7,25	33,50°C	7,84
B	37,70 °C	7,25	33,25°C	5,68
C	37,35°C	7,12	32,85°C	7,00
D	37,30°C	7,12	32,80°C	7,02
E	37,30°C	6,85	32,55°C	8,42
F	37,30°C	6,79	32,70°C	7,47
G	36,95°C	6,73	32,60°C	7,42
H	36,85°C	6,73	32,50°C	7,00
I	36,60°C	5,71	32,50°C	5,54
J	31,80°C	5,20	33,20°C	7,63
K	31,90°C	5,27	34,10°C	8,34
L	32,95°C	4,88	33,20°C	5,80
M	32,95°C	4,86	32,50°C	7,02
N	32,90°C	6,18	33,30°C	8,40
O	32,85°C	6,07	32,70°C	7,60
P	32,85°C	6,79	33,50°C	7,67
Q	32,90°C	6,18	33,10°C	7,00
R	31,90°C	5,39	34,80°C	5,80

Fonte: Autor

Verificou-se que não ocorreu uma variação significativa entre os pontos, podendo-se concluir que a velocidade do ar é constante em todo o secador.

Constatou-se que poderia ser simulado uma parte do secador, já que se considera essa velocidade do ar constante.

Tabela 9 - Resultados experimentais da pressão do ar

Pressão de entrada (Pascal)	Pressão de saída
- 205,8	- 313
- 166,6	- 323
- 176,4	- 284
- 188,7	- 294

Figura 21 - Local de coleta das pressões



Fonte: Autor

Nessa perspectiva, constatou-se que as altas pressões ocorreram próximas das entradas de ar, pois considera-se os dados coletados como valores negativos, sendo assim a pressão é maior na entrada e menor na saída do ar.

4.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Foi possível simular o fluxo de ar, de acordo com as características do secador de sistema real. Os Secadores Mega garantem maior capacidade de secagem em t/h (entre 10 t/h e 120 t/h em baixas temperaturas de ar, com 32°/33°C de temperatura de massa; entre 18 t/h a 300 t/h, em altas temperaturas de ar, com 37°/38°C de temperatura de massa). Os secadores possuem melhor rendimento de engenho (maior percentual de grãos inteiros, mínimo desgaste e manutenção com máxima eficiência energética, e menor inserção de equipamentos

complementares no fluxo do projeto, e também é composto por um sofisticado sistema de ciclone centrífugador em cada turbina com perfeita captação de pó e particulados.

O secador investigado consome o mínimo de energia possível comparado aos demais. As colunas facilitam a distribuição homogênea do ar. O fluxo misto dos grãos que desce pelas calhas oferece baixa resistência ao fluxo do ar. O qual, permite reduzir o consumo de energia, mantendo um grande volume de fluxo específico. Evita quebra do grão e tem requisitos mínimos de manutenção.

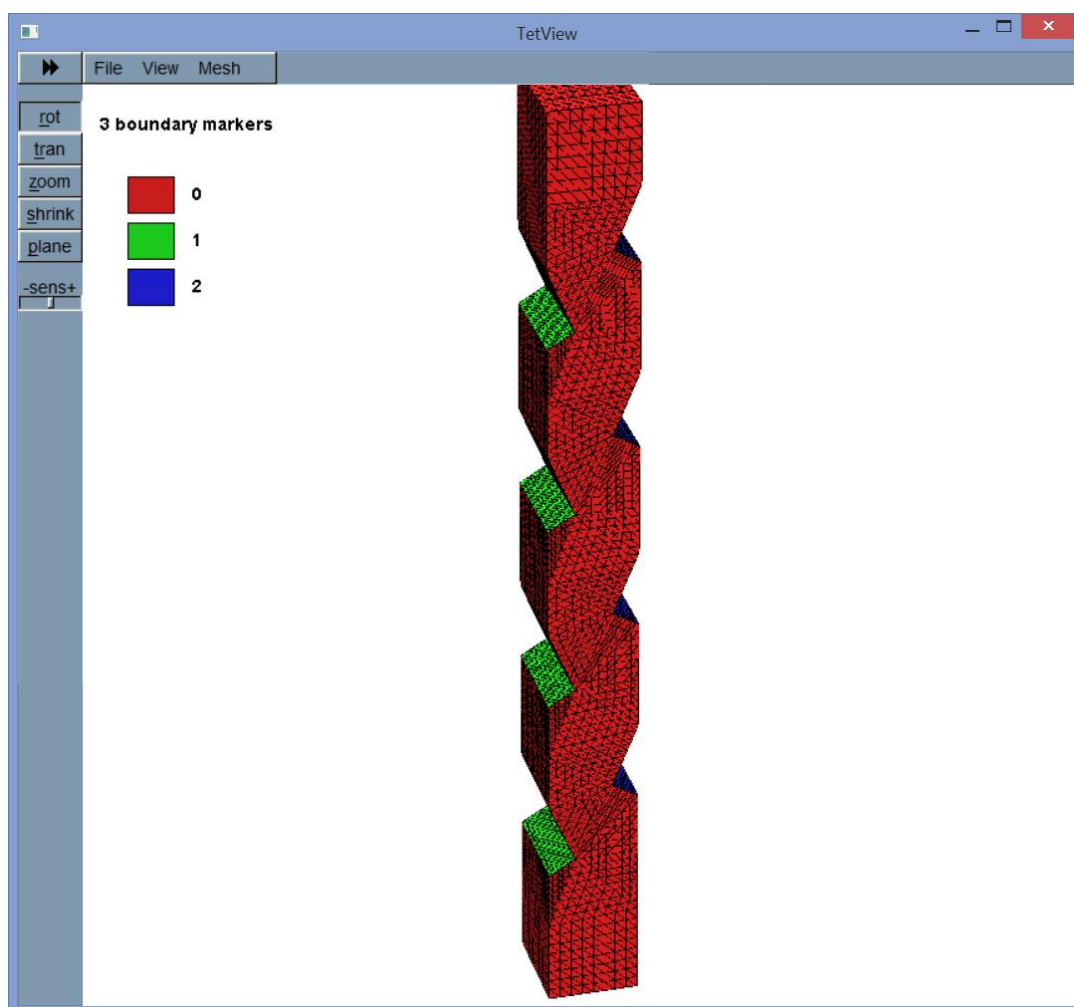
A massa de grãos desce em ziguezague dentro da coluna e uma corrente de ar seco e quente rodeia o grão de maneira uniforme quando o mesmo realiza seu movimento de rotação. O ar potencializa a transmissão de energia e absorve a umidade. Como resultado desse funcionamento eficaz, aumenta o desempenho por tonelada de grão em processo. E devido ao mencionado ele é considerado pela empresa sementeira Cambaí o melhor secador que eles têm até o momento comparando com os demais.

O secador possui 13,5 metros de altura, 2,9 metros de frente e sua lateral possui 9,5 metros. Possui três ventiladores que sugam o ar que passa entre a massa porosa dos grãos. As simulações de aeração no secador foram geradas utilizando a pressão. Os coeficientes apresentados no modelo matemático foram obtidos experimentalmente para o trigo. Todavia, o modelo matemático pode ser adequado para vários tipos de grãos como soja, arroz e grãos de milho.

Uma seção do secador investigado foi discretizada, conforme a Figura 22, representado em tetraedros utilizando o software NetGen, aliado em modelos matemáticos, pois seu refinamento e discretização da geometria são adequados para realizar a implementação do MEF. A criação da malha tetraédrica provém das reais características de parte do secador de grãos da empresa Cambaí.

A Figura 22 mostra a malha gerada pelo sistema TetGen e suas respectivas condições de contornos, onde a condição de contorno 0 corresponde à parede; a condição 1 corresponde à entrada de ar e a condição 2 corresponde à saída de ar.

Figura 22 - Malha tetraédrica para análise pelo MEF



Fonte: Autor

Após a execução do programa, foi obtido como resultado a simulação do fluxo de ar no secador de um sistema real onde a pressão é dada em Pascal (Pa). Verifica-se a entrada e saída do ar, que ajudam a equalizar o fluxo de ar na massa de grão. Através da análise da distribuição do ar, a simulação mostra em vermelho o grão, as entradas do ar em azul e as saídas do ar em verde.

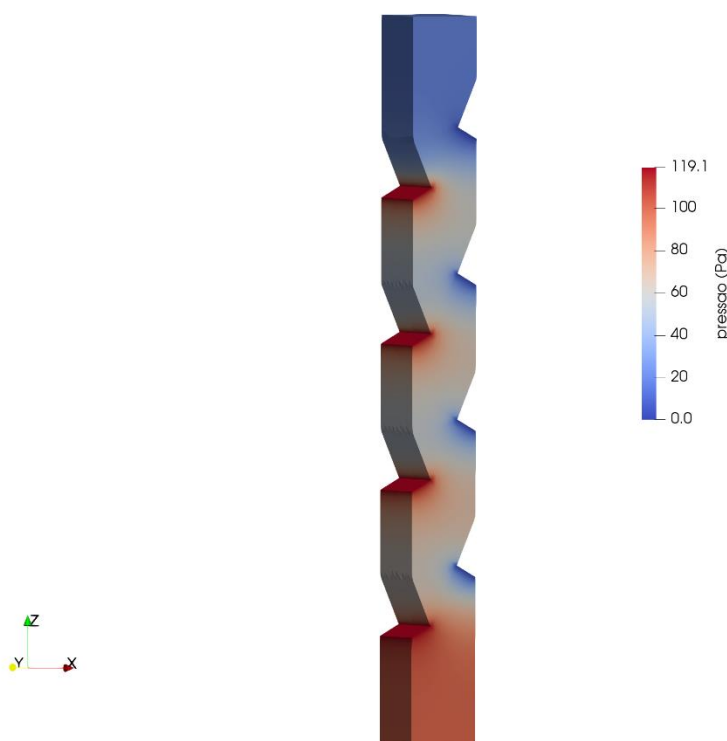
A análise da pressão é uma informação importante para análise da eficiência da aeração, pois deve-se obter a velocidade adequada para não provocar o arraste dos grãos e nem ocorrer a secagem excessiva do produto.

4.3 Confrontando Resultados Experimentais e Simulados

Para validar a modelagem matemática do fluxo 3D de ar em secadores de grãos, a simulação foi realizada considerando as condições de contorno de pressão medidas, e a vazão de ar resultante foi comparada ao observado experimentalmente.

A velocidade média na saída de ar do secador, nos dutos de ar que chegam ao difusor de saída, é de 6,695 m/s. Os dutos de saída para o difusor têm uma área total de 4,4 m². Portanto a vazão de ar total do secador de acordo com os dados experimentais é de 29,458 m³/s. A diferença de pressão média entre o difusor de entrada e saída é de 119,125 Pa. Essa informação foi utilizada como entrada para a simulação de uma seção da geometria. A distribuição de pressão é mostrada na Figura 23.

Figura 23 - Distribuição de pressão

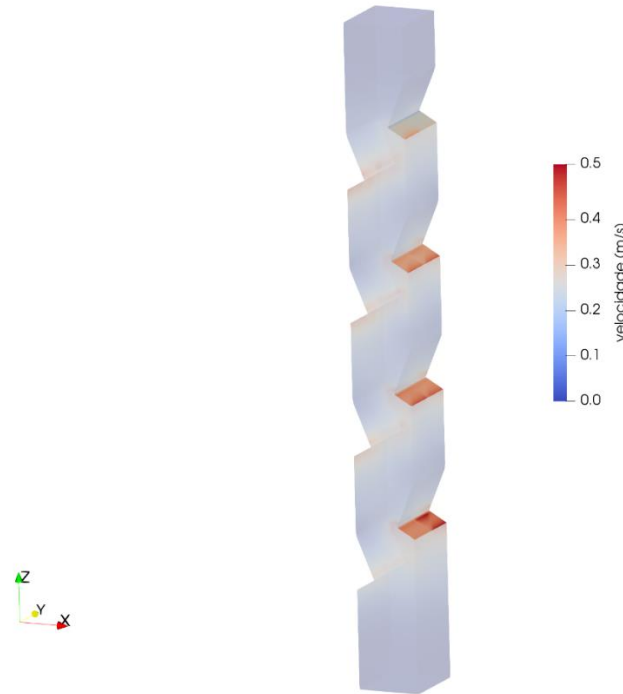


Fonte: Autor

A validação da simulação realizada é feita pela comparação da vazão de ar obtida na simulação, com a vazão de ar medida experimentalmente. A Figura 24 mostra a distribuição de velocidade, onde estão destacadas as áreas de saída do fluxo de grão. Neste caso foi considerada

a porosidade como sendo 0,43, que é o valor utilizado para silos e armazéns onde o modelo utilizado já foi validado.

Figura 24 - Velocidades nas saídas considerando porosidade 0.43



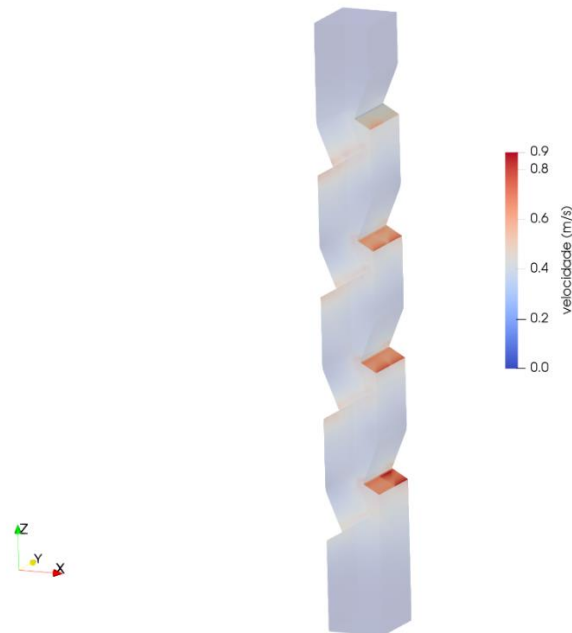
Fonte: Autor

Integrando-se a velocidade nas saídas, como destacado na Figura 24, e considerando a dimensão total do secador real, chega-se a uma vazão média de 0,004234 m³/s por saída. Considerando que o secador possui 360 saídas de ar da massa de grãos, a vazão total é de 17,5316 m³/s, equivalente a apenas 59,5% da vazão experimental, que é 29,458 m³/s. Este comportamento é esperado, já que existem dois fatores que aumentam a porosidade da massa de grãos se comparada com a armazenagem em silos, que são: a umidade e a movimentação dos grãos ao longo do secador. As simulações foram realizadas novamente, mas agora considerando um aumento na porosidade de 0,43 para 0,48. Para calcular esse aumento foi feita a correção no fator de proporcionalidade k , de acordo com o modelo de Kozeny–Carman:

$$k = \frac{\left(\frac{p^3}{(1-p)^2}\right)}{\left(\frac{p_0^3}{(1-p_0)^2}\right)} \quad (4.1)$$

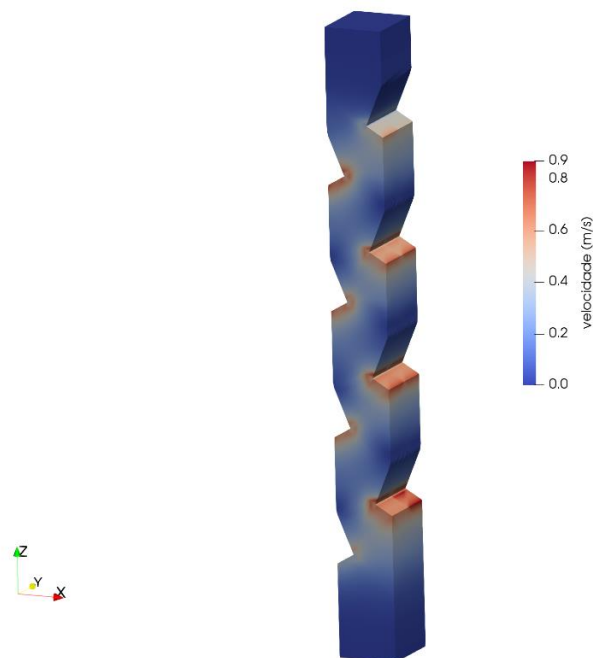
O resultado da velocidade é mostrado na Figura 25, como pode ser visto, os níveis de velocidade aumentam devido a menor resistência, e a vazão total no secador chega a 29,301 m³/s, consideravelmente mais próxima da vazão experimental, com um erro relativo de 0,53%. A Figura 26 mostra a distribuição de velocidade.

Figura 25 - Velocidade na saída, considerando porosidade 0,48



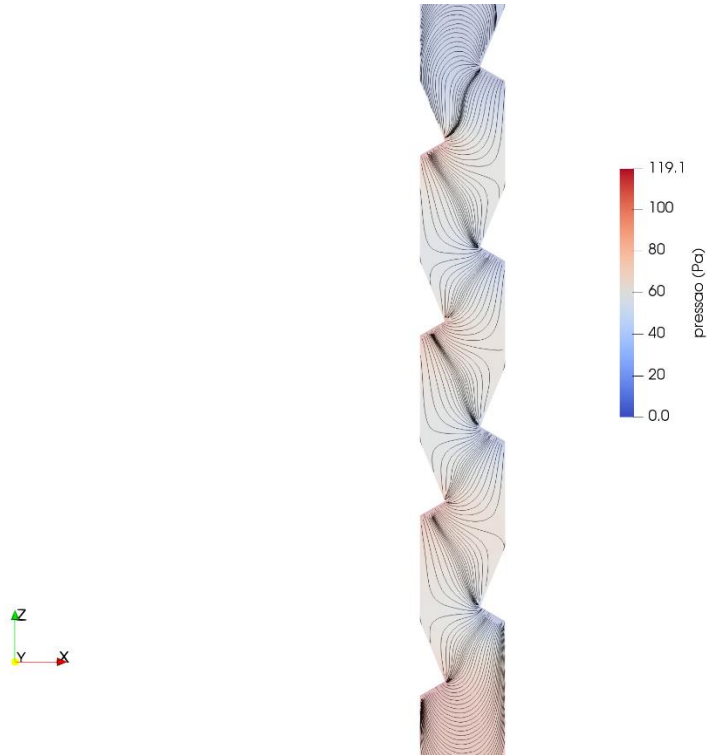
Fonte: Autor

Figura 26 - Distribuição de velocidade para porosidade 0.48



Fonte: Autor

Figura 27 - Distribuição das linhas de fluxo



Fonte: Autor

As linhas de fluxo de ar são mostradas na Figura 27, onde é possível notar que o ar com origem em uma entrada é dividido entre as duas saídas mais próximas, e como esperado, não são observados vértices ou zonas de recirculação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação apresentou a modelagem matemática e a simulação tridimensional do fluxo de ar em secadores de grãos de um sistema real. O modelo foi obtido baseado em dados experimentais, coletados no Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática do Departamento de Ciência Exatas e Engenharias da UNIJUÍ, e publicado em vários trabalhos.

Dessa forma, foi utilizado um programa com a aplicação do Método dos Elementos Finitos para o modelo criado, para que assim constituísse uma solução eficiente do problema, podendo resolvê-lo em malhas tridimensionais mesmo em computadores pessoais. Foram criadas as condições de contorno das entradas e saídas de ar, segundo o sistema real analisado. Através disso, foi possível simular e fazer a avaliação de desempenho do fluxo do ar de uma parte do secador de um sistema real.

Tais simulações foram realizadas com as mesmas condições descritas do experimento, obtendo resultados experimentais e simulados. Para validação do modelo do fluxo de ar em secadores de grãos de fluxo misto, foram confrontados resultados das pressões e velocidades do ar extraídas do processo experimental e simulado, e a vazão do ar foi o critério definido para a validação. Pois, a análise da pressão é uma informação importante para observar a real eficiência da aeração, pois deve-se obter a velocidade adequada para não provocar o arraste dos grãos e nem ocorrer a secagem excessiva do produto.

Considerando os dados experimentais coletados, concluiu-se que não seria necessário desenvolver a geometria de todo o secador, assim, foi simulada uma parte do secador o qual conseguiu-se verificar que os resultados observados não coincidem com os resultados simulados utilizando o coeficiente de porosidade adotado para armazéns, devido à diminuição de porosidade em secadores causada pela umidade e movimentação dos grãos. No entanto, ao ser adotado um coeficiente maior de porosidade (0,48), os dados simulados apresentaram concordância com os dados observados. Com isso, pode-se afirmar que o estudo da simulação tridimensional do fluxo de ar em secadores de grãos é de suma importância, pois pode ajudar engenheiros a projetar sistemas de secagem mais eficientes e previsíveis, com sistemas de controle mais confiáveis.

Com isso, o estudo da simulação tridimensional do fluxo de ar em secadores de grãos é de suma importância, pois pode ajudar engenheiros a projetarem sistemas de aeração mais eficientes e adequados às dimensões das estruturas de armazenamento, garantido assim o bom funcionamento do sistema.

Esta validação possibilita utilizar o modelo para melhorar e otimizar a distribuição do fluxo do ar em secadores de grãos de fluxo misto. Através de simulações, pode-se analisar e procurar melhorar a distribuição do fluxo do ar, melhorando a eficiência do processo de secagem. Conseguindo assim, verificar o funcionamento do secador observando o fluxo com a possibilidade de implementar um sistema de aeração mais abrangente e adequado. Para tanto, entende-se que os resultados obtidos neste trabalho podem servir para pesquisadores da área, pois considera-se que são análises importantes, as quais podem ser desenvolvidas em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- AHRENS, J., GEVECI, B. AND LAW, C. (2005) '*Paraview: An end-user tool for large data visualization*', The visualization handbook. Elsevier München, 717.
- AMBROSI, I. **Aspectos econômicos da cadeia produtiva de trigo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000.
- ASSAN, A. E. **Métodos dos elementos finitos** – Primeiros Passos. Editora da UNICAMP, Campinas, SP, 1999.
- AZEVEDO, L. F; OLIVEIRA, T. P; PORTO, A. G; SILVIA, F. S. **A capacidade estática de armazenamento de grãos no Brasil**. Artigo do XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, RJ, p.04-05, 2008.
- BALBINOT, Eliezer José. **Estudo dos efeitos das propriedades morforológicas sobre o escoamento de grãos de aveia**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2017.
- BARBOZA, Jennifer Valleriano. **Modelagem matemática e computacional do escoamento de grãos de soja utilizando o método dos elementos discretos**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2016.
- BASSANEZI, R. C. **Modelagem Matemática**, in: Dynamis, Blumenau, Univ.deBlumenau, pp. 55-83, 1994
- BIAGI, J. D.; BERTOL, R.; CARNEIRO, M. C. Secagem de grãos para unidades centrais de armazenamento. In: LORINI, I.; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M. (Eds.). **Armazenagem de grãos**. Campinas: Bio Gênesis Instituto, 2002. p. 289-307.
- BIHAIN, Anderson Luis Jeske. **Modelagem matemática da influência da umidade do ar, sobre a dinâmica de secagem de grãos de soja em camada fina**. 2011. 118 f. F. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2011.
- BORGES, P. A. P. **Modelagem dos processos envolvidos nos sistemas de secagem e armazenamento de grãos**. (2002). 112 f. Porto Alegre: UFRGS. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BORTOLAIA, Luis Antônio. **Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo**. 2011. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011.
- BRASIL. **Ministério da cultura e abastecimento**. Brasil projeções do agronegócio

2011/2012 a 2021/2022. Brasília, 2012.

BROOKER, D. B. Pressure patterns in grain drying systems established by numerical methods. *Transactions of the ASAE*, 1961. v. 4, n. 1, p. 72–74. DOI: 10.13031/2013.41013
 BRUCE, D. (1984). *Simulation of multiple-bed concurrent, counter, and mixed-flow grain driers*. Journal of Agricultural Engineering Research, 30, 361. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80037-2.

CAMBAÍ, **Sementeira Cambaí de São Luiz Gonzaga**. <http://cambai.com.br/site/>

CONAB, C. N. De A. **Série histórica de área plantada, produtividade e produção de grãos de soja das safras de 1976/77 a 2017/18**. CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2017.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira Grãos**. [S.l.], 2018.

CONAB. **Indicadores da Agropecuária**. [S.l.], 2018.

CORRÊA, P. C. et al. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo durante a secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2006. v. 10, n. 3, p. 665–670.

CORRÊA, P.; SILVA, J. Estrutura, Composição e Propriedades dos Grãos. In: SILVA, Juarez de Souza e. **Secagem e Armazenagem de produtos agrícolas**, Viçosa: Aprenda Fácil, 2008.

CUNHA, G. R. **Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, 2011.

CUNHA, G. R. **Trigo no MERCOSUL**: coletânea de artigos. Brasília: EMBRAPA, 1999.

DEVILLA, I. A; COUTO, S. M; QUEIROZ. *Airflow distribution in aerated silos: finite element analysis*. Rev. bras. Eng. Agrícola. Ambiente. Vol.9, Campina Grande Apr./June 2005.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa trigo (safra 2018/2019).

FAORO, Vanessa. **Modelagem e simulação 3D de armazéns graneleiros com aeração**. 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2014.

FARIAS NETO, A. L. et al. (2018) ‘Reação de cultivares de soja (glycine max (l.) merrill) a chuva na colheita.’, in *Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE)*.

FERREIRA, Thiago Rios. **Volume útil de pilha de granel com retomada inferior**. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

GUEDES, M. A. et al. **Caracterização física de grãos de soja utilizando-se processamento digital de imagens**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, 2011, v. 13, n. 3, p. 279–294.

HANG S. 2015. "[TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator](https://doi.org/10.1145/2629697)". ACM Trans. on Mathematical Software. **41** (2), Article 11 (February 2015), 36 pages. DOI=10.1145/2629697 <http://doi.acm.org/10.1145/2629697>

HASTENPFLUG, M. **Desempenho de cultivares de trigo duplo propósito sob doses de adubação nitrogenada e regimes de corte**. 2009. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2009.

JOKINIEMI T., M. HAUTALA, T. OKSANEN, J. AHOKAS. *Parallel plate heat exchanger for heat recovery in farm grain dryer* *Drying Techno.*, 34 (5) (2016), pp. 547-556.

JOKINIEMI, T; AHOKAS, J. *Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer* *Biosys. Eng.*, 121 (2014), pp. 209-220.

KHATCHATOURIAN, O. A; BINELO, M.O. *Simulation of three-dimensional airflow in grain storage bins*. *Biosystems Engineering*, p. 225-238, 2008.

KWIATKOWSKI, J. E. **Simulação e controle do sistema de aeração da massa de grãos de soja**. Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí), Ijuí, 2011.

KHATCHATOURIAN, O. A; SAVICKI, D. L. *Mathematical Modelling of Airflow in an Aerated Soya Bean Store under Non-uniform Conditions*. *Biosystems Engineering*, (2004) 88(2), p. 201-211.

LIMA, R. F. d. **Modelagem Matemática do Escoamento de Grãos de Soja em um Secador com Fluxo Misto Usando o Método dos Elementos Discretos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2014.

MATA, M.; DUARTE, M. E. M. **Porosidade intergranular de produtos agrícolas**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 79–93, 2002.

MCFARLANE, N., & BRUCE, D. (1991). *Control of mixed-flow grain driers: Development of a feedback-plus-feed forward algorithm*. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 49, 243 - 258. Doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0021-8634\(91\)80042-D](http://dx.doi.org/10.1016/0021-8634(91)80042-D).

MELLMANN, J. et al. *Moisture content and residence time distributions in mixed-flow grain dryers*. *Biosystems Engineering*, 2011, v. 109, n. 4, p. 297–307.

MELLMANN, L. K., K. GOTTSCHALK, Cs. MESZAROS, I. *Farkas Development of the heat and mass transfer model for mixed-flow grain dryer* *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea (2008), pp. 9591-9595.

MUNDSTOCK, C.M. **Planejamento e manejo integrado da lavoura de trigo**. Porto Alegre: Evnagraf, 1999.

NUNES J. A. S., et al. **Determinação do ângulo de repouso, volume unitário, eixos ortogonais e esfericidade de trigo**. *Acta Iguazu*, 3, 77-86, 2014. ISSN 2316-4093.

OKSANEN, T. *Controlling air flow in recirculating mixed flow batch dryer with double bed mode*. Comput. Electron. Agric.(2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.018>

OLIVO, Tânia Evelyn. **Determinação da umidade da soja por medida capacitativa**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

OpenScad. <http://www.openscad.org>.

ORO, Neuza Terezinha. **Modelagem e simulação do processo de secagem em secador de fluxo contínuo**. 1999. 112f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 1999.

PARK, K. J. *et al.* **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. CT&EA, Campinas: Unicamp, 2007.

PARRY, J. L. (1985). *Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review*. Journal of Agricultural Engineering Research, 32(1), 1e29.

PEREIRA, J. A. M. **Aeração de Grãos: Fundamentos e Manejo**. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem - Centreinar, Viçosa, 1995.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. [S.l.]: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 2000.

RIBEIRO, D. M; CORRÊA, P. C; RODRIGUES, D. H; GONELI, A.L.D. **Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem**. Universidade Federal de Viçosa MG, 2005.

SCHEEREN, P. L.; CASTRO, R. L.; CAIRÃO, E. **Botânica, morfologia e descrição fenotípica**. In: BORÉM, A., SCHEEREN, P. L. Trigo: do plantio à colheita. Viçosa, Minas Gerais: Editora UFV, 2015, c. 2, p. 35-55.

SI H. *TetGen-A Quality Tetrahedral Mesh Generator and Three-Dimensional Delaunay Triangulator*. January 18, Version 1.4, Berlin, 2006, disponível em <http://wiasberlin.de/software/tetgen/>

SI H. *TetGen-A Quality Tetrahedral Mesh Generator and Three-Dimensional Delaunay Triangulator*. Visualizador TetView, January 18, Version 1.4, Berlin, 2006, disponível em: <http://tetgen.berlios.de/tetview/>

SILVA, J. De S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. **Secagem e secadores**. In: SILVA, Juarez de Souza e. Secagem e Armazenagem de produtos agrícolas, Viçosa: Aprenda Fácil, 2000.

SILVA, J. d. S.; AFONSO, A. D. L. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000.

SILVA, L. C. **Operação de Secadores Cascata**. Departamento de Engenharia Rural. Universidade Federal do Espírito Santo. 2006.

ŠMILAUER, Václav. *Woo documentation*. 2016. Disponível em: <<https://woodem.org/Woo.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

TMSA. <https://www.tmsa.ind.br/>

TRINDADE, Marcelo da Silva. **Secagem de soja em camada espessa: modelagem matemática e simulação numérica**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

WEBER, E. **Armazenagem Agrícola**, Kepler Weber Industrial. 2ª. Ed. Porto Alegre, 1998. v. 2ª, p. 400.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Canoas, RS. Editora Salles, 2005.

WEIGLER, H. S., J. MELLMANN. *Investigation of particle and air flow in a mixed-flow dryer Drying Technol.*, 30 (15) (2012), pp. 1730-1741.