



**Leonardo Damschi**

**AVALIAÇÃO DA SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA (*GLYCINE MAX*) ATRAVÉS  
DE LEITO FIXO E FLUIDIZADO**

Horizontina - RS  
2020

**Leonardo Damschi**

**AVALIAÇÃO DA SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA (*GLYCINE MAX*) ATRAVÉS  
DE LEITO FIXO E FLUIDIZADO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof., Dr. Ederson Rossi Abaide.

Horizontina - RS

2020

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso**

**“Avaliação da secagem de grãos de soja (*Glycine max*) através de leito fixo e fluidizado”**

**Elaborada por:  
Leonardo Damschi**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 11/12/2020  
Pela Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Ederson Rossi Abaide  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

---

Prof. Me. Francine Centenaro Gomes  
FAHOR – Faculdade Horizontina

---

Prof. Dr. Geovane Webler  
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS  
2020**

À toda minha família, especialmente minha mãe, por sempre acreditar em mim e sempre buscar ajudar na minha caminhada, e ao meu pai, por me mostrar desde cedo as aplicações e diferentes áreas de um Engenheiro Mecânico e por não medir esforços na manufatura do protótipo presente nesta pesquisa.



## RESUMO

De acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), em 2019 a capacidade de armazenamento de grãos foi de 175,5 milhões de toneladas versus 242 milhões de toneladas de grãos e oleaginosas produzidos, o que mostra que o Brasil ainda tem muito para crescer no seu principal monopólio, o cultivo de grãos. A soja é um dos produtos cultivados mais importantes para a economia e é necessário eficiência e qualidade. Para avaliar as melhores configurações de secagem, neste referente trabalho foram avaliados dois tipos diferentes de secadores de grãos, leito fixo e leito fluidizado. Onde foram variadas as grandezas de temperatura e velocidade de ar de seco para analisar as suas respectivas influências, bem como o consumo de energia para as demais configurações. A partir da necessidade do estudo das características de secagem para a manutenção da qualidade, processamento eficiente e níveis de consumo energético aceitáveis. Foi construído um protótipo com o intuito de realizar ensaios e relatar as curvas de secagem verificadas durante a secagem de soja. As amostras avaliadas foram reumidificadas através de um processo de vaporização e constatado a umidade de 28,5%, onde seguiu-se para a avaliação de secagem até a marca de 10% de umidade de bulbo seco. Com os dados colhidos durante os experimentos, realizou-se os referidos cálculos para a obtenção da energia consumida pelo resistor e pela turbina de vazão de ar. Assim, se chegou à conclusão que em maiores temperaturas a secagem se dá em menor tempo e mesmo requerendo uma potência maior, o consumo é mais baixo. Quanto a vazão, foi constatado que a mesma não afeta significativamente no processo.

**Palavras-chave:** Secador de grãos. Leito fixo. Leito fluidizado.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ângulo de talude no armazenamento de grãos em silos verticais .....	15
Figura 2: Esquema da determinação do ângulo de talude .....	16
Figura 3: Diagrama representativo da respiração em grãos .....	16
Figura 4: Representação de adsorção e dessorção a temperatura constante .....	19
Figura 5: Curva de secagem de acordo com suas fases, em função do teor de umidade .....	22
Figura 6: Gráfico para armazenagem seguro da soja.....	22
Figura 7: Influência do ar de seco sobre a curva de secagem da soja .....	25
Figura 8: Secagem de duas variantes de proteína de soja.....	26
Figura 9: Esquema de secagem por leito fixo.....	27
Figura 10: Demonstração do processo de secagem .....	28
Figura 11: Secador de leito fluidizado .....	29
Figura 12: Queda de pressão X Velocidade de fluxo.....	29
Figura 13: Variação na velocidade e na porosidade de acordo com a pressão .....	31
Figura 14: Cilindro de secagem e armazenagem .....	39
Figura 15: Motor elétrico PRISMA15 5M (A) e turbina com controle de vazão manual (B).....	40
Figura 16: Mecanismo de Tubo de Venturi.....	41
Figura 17: Resistência aquecedora .....	42
Figura 18: Dimmer controlador de tensão .....	42
Figura 19: Duplo Termo Higrômetro AKRON .....	43
Figura 20: Balança de precisão.....	44
Figura 21: Esquema do sistema de secagem por leito fixo e leito fluidizado .....	44
Figura 22: Protótipo para secagem de grãos .....	46
Figura 23: Avaliação geral das curvas de secagem em leito fluidizado .....	49
Figura 24: Avaliação geral das curvas de secagem em leito fixo .....	51
Figura 25: Potência requerida para cada experimento .....	53
Figura 26: Diferença de consumo de energia.....	54

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Quantidade de aminoácidos no grão de soja em g/16gN .....	17
Quadro 2: Relação de equipamentos e suas funções no sistema .....	45
Quadro 3: Alturas de fluido na avaliação da velocidade do ar .....	47
Quadro 4: Resultados encontrados de velocidade e vazão de ar para os três testes .....	48
Quadro 5: Análise de vazão mínima de fluidização .....	48
Quadro 6: Determinantes para cálculo de energia para o sistema .....	52
Quadro 7: Dados parciais de consumo de energia .....	53
Quadro 8: Ensaio com maior eficiência .....	55



## **LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS**

FAO – Organização da Alimentação e Agricultura

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Secex – Secretaria de Comércio Exterior

SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural

## SUMÁRIO

<b><u>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</u></b> .....	<b>11</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	11
1.2 TEMA.....	12
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA .....	12
1.4 HIPÓTESES .....	12
1.5 JUSTIFICATIVA.....	13
1.6 OBJETIVOS.....	13
<b>1.6.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>13</b>
<b>1.6.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>13</b>
<b><u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA</u></b> .....	<b>14</b>
2.1 PROPRIEDADES DOS GRÃOS .....	14
2.1.1 Propriedades químicas da soja (Glycine max) .....	17
2.2 FUNDAMENTOS DA SECAGEM.....	18
2.2.1 Dinâmica de secagem.....	20
2.2.2 Ação do calor sobre os grãos.....	23
2.2.3 Temperaturas limites de secagem.....	24
2.2.4 Ação da velocidade de ar seco .....	25
2.3 SECAGEM DE GRÃOS .....	26
2.3.1 Secagem em leito fixo .....	26
2.3.2 Secagem em leito fluidizado.....	28
2.4 COMPARATIVOS DE EFICIÊNCIA.....	30
<b><u>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA</u></b> .....	<b>32</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA SECAGEM DOS GRÃOS DE SOJA .....	32
3.1.1 Determinação da umidade da amostra.....	32
3.1.2 Demanda energética do secador .....	33
3.1.3 Cálculo de energia a ser fornecida pelo resistor.....	35
3.1.4 Pressão X Velocidade de ar .....	35
3.1.5 Altura de grãos no secador .....	36
3.1.6 Umidificação dos grãos de soja.....	37
3.1.7 Procedimento padrão para os experimentos .....	37
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	38
<b>3.2.1 Cilindro de armazenamento .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.2 Turbina de compressão .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.3 Gerador de calor .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.4 Higrômetro.....</b>	<b>42</b>
3.2.5 Balança de precisão.....	43
3.2.6 Desenho.....	44
<b><u>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSÃO</u></b> .....	<b>46</b>
4.1 PROTÓTIPO CONSTRUIDO .....	46
4.2 AVALIAÇÃO DA VAZÃO DE AR ENTREGUE AO SISTEMA.....	47
4.3 CINÉTICAS DE SECAGEM .....	48
4.3.1 Experimentos em leito fluidizado.....	48
4.3.2 Experimentos em leito fixo .....	50
4.4 CONSUMO ENERGÉTICO .....	52
<b><u>CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO</u></b> .....	<b>56</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	56
5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	56
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

A modernização do setor agrícola e o aprimoramento dos processos de plantio e de colheita no Brasil ao longo dos últimos anos tem levado a um grande aumento na produção de alimentos, principalmente grãos como milho, soja, arroz, feijão, trigo e cevada que são a base para suprir a demanda alimentícia da pecuária, avicultura e do consumo humano. Entretanto depois que o produto sai do campo o problema começa a ser percebido, primeiramente na logística até o cerealista e depois no processo de armazenagem do mesmo. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2019 a capacidade de armazenamento de grãos foi de 175,5 milhões de toneladas versus 242 milhões de toneladas de grãos e oleaginosas produzidos, o que mostra que o setor ainda está ineficiente.

Visando essa realidade é necessário que os processos de armazenamento e prolongamento da qualidade do produto sejam aprimorados, para que haja uma maior circulação do grão no silo em um período de tempo menor e com menor custo de processamento. Para Baroni, et al. (2017), existe a demanda por locais adequados para que se possa armazenar esses produtos por um período de tempo maior e conservar as propriedades dos grãos colhidos, pois é de grande importância que o sistema de secagem seja eficiente, para que a qualidade e características primárias do grão sejam preservadas e, assim, garantindo uma menor taxa de depreciação.

Para amenizar esse grande gargalo no setor cerealista do Brasil é necessário que os silos possuam maior circulação de produto, principalmente na saída para os portos já que o país é um dos maiores exportadores de soja e milho. O processo que mais demanda tempo é o de secagem, pois requer um grande cuidado para que o grão não sofra alterações em sua composição ou posteriormente se deteriore com a presença de fungos e microrganismos.

A solução para o problema pode estar no estudo da secagem por leito fixo ou fluidizado, onde estes dois tipos apresentam passagem de ar quente através da massa de grãos no silo, entretanto cada um possuindo suas particularidades. A partir dessa análise será possível observar qual método apresenta maior eficiência de secagem, melhor manutenção da qualidade e menor consumo energético.

## 1.2 TEMA

Dimensionamento de um sistema de secagem para silos verticais sobre a eficiência do processo de secagem de grãos sob efeito da circulação de ar na unidade.

## 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

No armazenamento de grãos existem dois fatores que implicam em sua conservação, os agentes bióticos (fungos, insetos, pragas, etc) e abióticos (temperatura e umidade) (Santos, 2019). A umidade dos grãos pode ser considerada a variável mais importante no decorrer do processo, pois segundo Milman (2002), a umidade inicial é um determinante para estabelecer as condições de processamento, secagem, armazenagem e comercialização dos produtos agrícolas.

O processo de secagem envolve a retirada parcial de água do grão através da troca de calor e umidade entre o ar e o produto, por meio de fluxo de vapor. Porém essa etapa pode levar bastante tempo, podendo variar de minutos até muitas horas dependendo da temperatura e da porcentagem de umidade contida nos grãos. Entretanto a temperatura deve ser monitorada para não ultrapassar o recomendado, pois podem ocorrer danos e criar condições apropriadas para a proliferação de microrganismos e pragas, que no final reduzirão a qualidade do produto, acarretando na diminuição de seu valor de mercado. (Milman, 2002)

A partir dessa preposição, faz-se o seguinte questionamento: Qual leito de secagem obterá maior eficiência de secagem em relação ao tempo, possua baixo consumo energético e, ainda assim, mantendo a qualidade do produto?

## 1.4 HIPÓTESES

Para que um projeto seja válido é necessário avaliar se será viável para o cliente, então deve-se observar diversas formas de entregar o resultado esperado com a maior eficiência possível e baixo custo de operação e manutenção. Por essa questão foram analisadas algumas situações possíveis para solucionar o problema relatado:

- a) Criação de uma unidade com tecnologia de leito fixo sob pressão de ar intermitente;
- b) Emprego da secagem por leito fluidizado em uma unidade de armazenagem;
- c) Gradientes de temperatura e velocidade do ar mais/menos acentuados.

De acordo com a pesquisa a seguir será possível constatar qual modelo de solução melhor atende os objetivos propostos e será mais adequado à situação apresentada.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

Como já citado anteriormente a capacidade de armazenamento dos silos está muito abaixo do necessário para suprir todo o montante produzido, entretanto boa parte dessa quantidade não se restringirá somente no país, segundo dados da Secretaria de Comércio Exterior (Secex) em 2019 o Brasil exportou mais de 77,9 milhões toneladas de soja e 44,9 milhões toneladas de milho, colocando o Brasil entre um dos líderes mundiais na produção e exportação desse tipo de cultura.

É importante economicamente para a nação agilizar o processo de chegada dos produtos ao porto, assim, com um sistema aprimorado de secagem, é possível obter maior vazão de despacho quando se comparado com a maneiras atuais, bem como a liberação de espaço no armazém sem a necessidade de ampliação. Por estes motivos, é necessário o estudo de novos métodos de secagem e suas variáveis, sendo possível obter uma um grão com menores chances de degradação durante a armazenagem e diminuir o tempo de processamento no secador.

## 1.6 OBJETIVOS

### 1.6.1 Objetivo Geral

Projetar e construir um protótipo de sistema de secagem por leito fixo e leito fluidizado em escala de bancada para avaliar o efeito da velocidade e da temperatura de ar na cinética de secagem.

### 1.6.2 Objetivos Específicos

- Projetar um sistema de secagem em leito e fixo e fluidizado;
- Construir o protótipo de secagem;
- Avaliar o efeito de diferentes velocidades de ar na curva cinética de secagem dos grãos de soja.
- Avaliar o efeito de diferentes temperaturas de ar na curva cinética de secagem dos grãos de soja.
- Avaliar o consumo energético do processo.

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 PROPRIEDADES DOS GRÃOS**

Conforme o Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR, 2018) os grãos sempre devem ser colhidos após atingirem sua maturidade, ou seja, quando o peso de matéria seca atingir seu ápice. Contudo, embora estejam em período de dormência o produto possui todas as propriedades de um organismo vivo e necessita cuidados para não haver sua degradação acelerada. Para isso é de suma importância submetê-lo ao processo de secagem.

A soja é rica em proteínas, vitaminas e minerais e por esses motivos recebe muitos empregos dentro da indústria, por se tratar de uma aliada à saúde humana, e possível substituição de derivados do petróleo. Entretanto, o manejo inadequado dos grãos e do sistema de secagem pode trazer graves danos ao produto, podendo mudar assim toda a sua estrutura e afetar seu potencial como matéria-prima. (Oliveira, 2018)

Segundo Elias et al (2018), ao se armazenar uma massa de grãos, ela fica sujeita a diversos fatores, como umidade, oxigênio, organismos associados e enzimas. A caracterização dos grãos se estende desde a composição química até seu arranjo celular, o que delimita a longevidade, manutenção da qualidade e a aptidão industrial do produto.

Apesar das vantagens que proporciona, Oliveira (2008) cita que a secagem pode ser potencialmente danosa para a qualidade da soja, pois o processo depende muito do correto manejo dos teores iniciais e finais de umidade do produto, da temperatura, da umidade relativa, do fluxo de ar, da taxa de secagem e do período de exposição ao ar quente. São cinco as principais características que implicam na qualidade dos grãos de soja, sendo a porosidade, condutibilidade, hidrosopicidade, ângulo de talude e respiração. (Elias et al., 2018)

A porosidade se divide em intergranular (entre os grãos) e intragranular (dentro dos grãos), onde para a secagem e armazenagem a porosidade intergranular tem maior influência, pois está intimamente ligada à maior ou menor pressão estática, e essa com a maior ou menor facilidade de circulação de ar. (Elias et al, 2018)

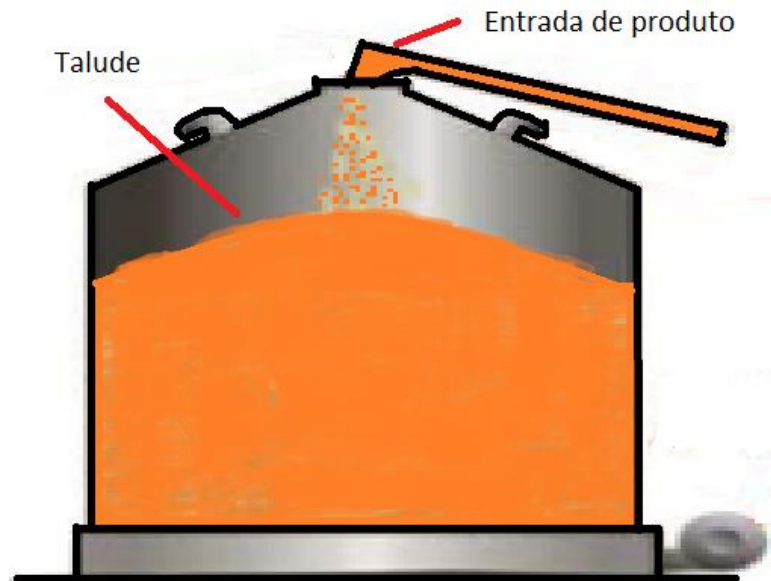
A condutibilidade térmica pode ser entendida como uma propriedade termo física do produto e, sendo assim, uma propagação de calor na massa do produto. Quando armazenado em silos ou conglomerados não trocam calor com o meio ambiente com

facilidade, pois possui uma baixa condutividade térmica e pode-se afirmar que é um bom isolante térmico. Este nível de transmissividade é influenciado pela taxa de umidade no grão, o que quando em níveis muito elevados pode acarretar num aumento na degradação, entretanto estando em níveis aceitáveis pode auxiliar na boa conservação do produto. (Zucchi, 2011; Oliveira, 2018)

Pode ser considerado higroscópico um grão que ganha ou perde água de acordo com a umidade relativa do meio ambiente. Isso está muito presente em produtos alimentícios como a soja e se tornando fundamental para o manuseio, estocagem e consumo. Dessa forma para cada umidade relativa a certa temperatura, o produto possui uma taxa de água no seu interior, denominando-se como equilíbrio higroscópico. (Freitas, 2016)

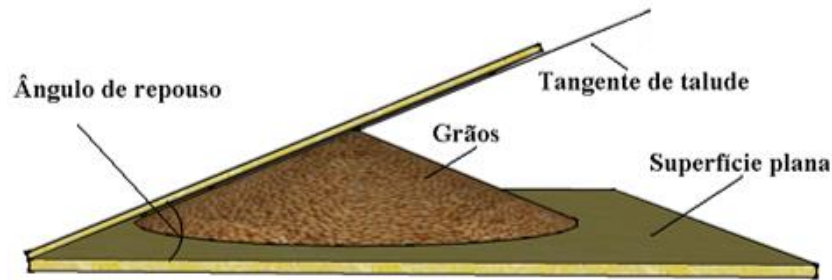
O ângulo de talude ou ângulo de repouso natural é muito importante na armazenagem de produtos agrícolas e partículas sólidas pois é utilizado em projetos de sistemas de colheita, manuseio e estocagem. É definido pelo produto com a horizontal ao escoar através de um fluxo constante e é expressado em graus sendo influenciado decisivamente pelo tamanho, forma, orientação das partículas e umidade (Figuras 1 e 2). (Naka, 2010)

Figura 1: Ângulo de talude no armazenamento de grãos em silos verticais



Fonte: Adaptado de Mallet, Agrocult (2010)

Figura 2: Esquema da determinação do ângulo de talude



Fonte: Corrêa (2014)

A respiração dos grãos pode ser uma grande aliada à sua deterioração prematura, por produzir energia e ocasionar a perda de peso, aumento da umidade e temperatura da massa total e a proliferação de fungos e pragas. A respiração é dividida em dois tipos: Aeróbica, com presença de oxigênio, provocando a oxidação completa da glicose e produzindo dióxido de carbono, água e energia; Anaeróbica, não havendo existência de oxigênio em sua reação e, diferentemente da aeróbica, fazendo a total deterioração da glicose e formando dióxido de carbono, álcool etílico e energia. (Faroni, 2008)

Dessa forma, durante o armazenamento de produtos de classe cerealista devesse evitar que a intensidade de respiração aumente demais, pois esta acelera a si própria trocando umidade e gradientes mais altos de temperatura (Figura 3), o que favorece a proliferação de mofos. (Júnior, 2004)

Figura 3: Diagrama representativo da respiração em grãos



Fonte: Adaptado de Júnior, 2004



### 2.1.1 Propriedades químicas da soja (*Glycine max*)

A soja se caracteriza por ser um grão de propriedade calórico-proteico e por este motivo acaba sendo um dos alimentos de nutrição mais importantes para o mundo. A proteína da soja é a única capaz de substituir a proteína animal, pois possui todos os aminoácidos necessários e em quantidade proporcional ao recomendado, fração lipídica rica em ácidos graxos poli-insaturados e carboidratos com funções probióticas, suplementos alimentares que atuam benéficamente para o organismo consumidor. (Mandarino, 2017)

Entretanto a sua composição e teor de propriedades dependem de diversos fatores, como a classificação do grão, localização geográfica, condições ambientais e tempo de plantio. Sua formação essencial é composta por aproximadamente 8% de casca, 90% de cotilédones (armazenamento de reservas e formação das primeiras folhas em caso de germinação) e 2% de hipocótilo (responsável pelo crescimento da planta). Geralmente a sua composição química seca é formada por aproximadamente 40% de proteínas, 20% de óleo, 35% de carboidratos e 5% de fibras. (Gonçalves, 2014)

O principal nutriente da soja, a proteína, também possui grande quantidade de aminoácidos essenciais como a lisina e leucina (Quadro 1), superando até os padrões de referência FAO (Organização da Alimentação e Agricultura) das Nações Unidas. (Gonçalves, 2014; Santos, 2010)

Quadro 1: Quantidade de aminoácidos no grão de soja em g/16gN

SOJA			
Aminoácidos Essenciais	Padrão FAO (g/16gN)	Grão (g/16gN)	Farinha (g/16gN)
Cistina	4,2	1,3	1,6
Isoleucina	4,2	4,5	4,7
Leucina	4,8	7,8	7,9
Lisina	4,2	6,4	6,3
Metionina	2,2	1,3	1,4
Fenilalanina	2,8	4,9	5,3
Treonina	2,8	3,9	3,9
Triptofano	1,4	1,3	1,3
Tirosina	2,8	3,1	3,8
Valina	4,2	4,8	5,1

Fonte: Adaptado de Mandarino, 2017

É importante conhecer as características químicas da soja e o que ela disponibiliza para o organismo, pois assim pode-se projetar sistemas de secagem mais eficientes e que não provoquem a degradação de suas propriedades. Já se sabe que todos os alimentos sofrem mudanças durante a secagem e estocagem, principalmente se induzidos a temperaturas elevadas, reduzindo a qualidade se comparado com o produto fresco. O que se procura é diminuir a taxa de degradação química, onde as principais alterações são:

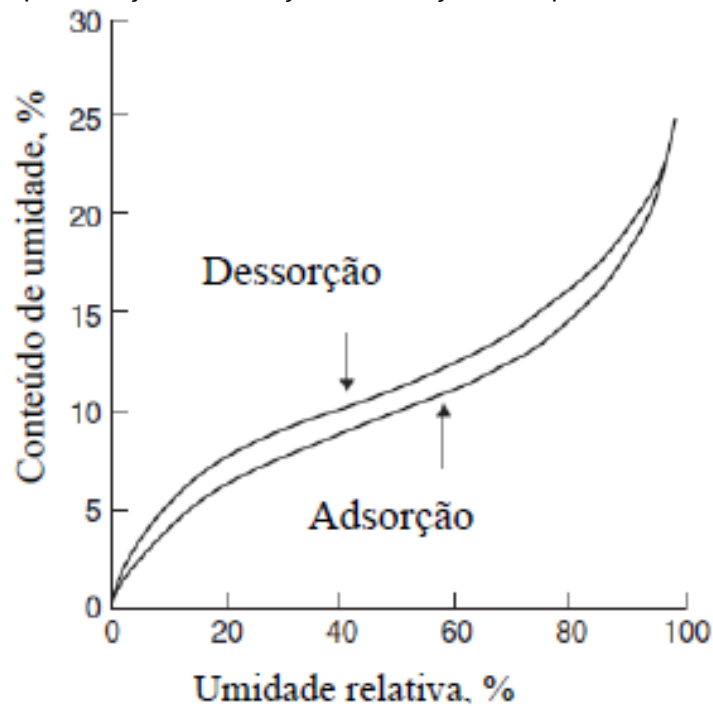
- Gelatinização do amido: forma uma camada impermeável em redor do grão, impossibilitando sua respiração;
- Alteração das moléculas cristalinas para amorfas, principalmente em açúcares;
- Escurecimento não-enzimático: mudanças na cor, sabor e valores nutritivos;
- Perda de substâncias aromáticas voláteis;
- Diminuição ou incapacitação da reabsorção de umidade. (Santos, 2013)

## 2.2 FUNDAMENTOS DA SECAGEM

Os produtos agrícolas, de modo geral, possuem capacidade de reter e expulsar água, esses fenômenos são conhecidos respectivamente como adsorção e dessorção. Estas ocorrem devido à hidroskopicidade entre o produto e o ar, como a quantidade de vapor d'água que circunda o grão e a afinidade da água com as características do mesmo (gordura, proteínas, amido, etc.). Dessa forma, sempre que a porcentagem de água interna do produto fica em equilíbrio com a porcentagem de umidade relativa do ambiente a determinada temperatura, têm-se o equilíbrio higroscópico. (Oliveira, 2018).

O equilíbrio na transferência de água também é compreendido como "isotermas de equilíbrio", pois os valores plotados para dessorção bem como adsorção correspondem a mesma faixa de temperatura. Na Figura 4 é possível observar que houve a presença do fenômeno de histerese, em que os valores de ganho e perda de água são diferentes para a mesma condição. Isso permite a interpretação que a velocidade de adsorção de água no grão é menor que a velocidade de dessorção e representando a existência do fenômeno de histerese, onde as curvas de secagem e reumidificação do produto são diferentes em função do tempo. (Silva et al., 2013)

Figura 4: Representação de adsorção e dessorção a temperatura constante



Fonte: Adaptado de Hellwig, 2019

Segundo Zeymer (2017), para que se possa calcular e plotar um gráfico das isotermas, Henderson em 1952 propôs um modelo matemático para determinar os valores de adsorção tanto para dessorção. Posteriormente alguns autores a modificaram dando origem a uma equação com resultados muito plausíveis para diversos tipos de alimentos e se tornando amplamente utilizada para esse tipo de levantamento numérico. O modelo de Henderson Modificado, como se chama, é representado pela Equação 1:

$$U_e = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)^{\frac{1}{c}}}{-a(T + b)} \right] \quad (1)$$

Em que  $U_e$  é a umidade de equilíbrio (% b. s.),  $a_w$  a atividade de água (decimal),  $T$  é a temperatura (°C) e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes do modelo para o alimento em questão.

Outro ponto a ser analisado em alimentos com alta incidência de proteínas e amido e que são granulares ou com poros abertos, é o mecanismo de capilaridade, pois principalmente no início do processo de secagem quando a umidade relativa é maior há um maior movimento do líquido no interior do grão, pela ação de forças resultantes entre os efeitos da tensão superficial e da pressão. A tensão superficial do

líquido faz com que surja uma diferença de pressão através de uma superfície líquida encurvada. Quando a geometria é esférica é possível conhecer essa diferença de pressão pela Equação 2:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (2)$$

Onde  $\Delta P$  é a diferença de pressão (Pa),  $\gamma$  a tensão superficial do líquido/gás (Pa) e  $r$  é o raio de curvatura do grão (m). (Santos, 2013)

Para completar e dar ligação entre as partes vistas nesse capítulo, Zeymer (2017) afirma que durante a adsorção o capilar dos poros começa a encher de água, devido ao aumento da umidade relativa. Dessa forma, quando a pressão do vapor de água do ambiente se torna mais alta que a pressão do vapor de água do capilar do grão, fazendo com que o poro se umidifique. Já na dessorção, a pressão parcial do ar ambiente deve ser menor que a pressão interna de vapor do capilar, assim forçando o poro saturado expelir a umidade excedente.

### 2.2.1 Dinâmica de secagem

Todo cereal apresenta em sua constituição algumas particularidades que devem ser preservadas durante sua jornada, do plantio ao consumo, não sendo diferente com a soja. Para a colheita o teor de umidade recomendável no grão está entre 16 e 18%, entretanto para que o mesmo perpetue sua qualidade e características de acordo com as originais durante um tempo razoável de armazenamento, a umidade deve circundar entre 9 e 12%. Valores acima ou abaixo dessa faixa podem acarretar em problemas na conservação do produto, sendo que valores maiores de umidade acabam acelerando o processo de degradação e tornando favorável a proliferação de fungos e reações enzimáticas. Já a secagem excessiva ocasiona o desprendimento da casca da soja e a sua quebra, aumentando a área de contato com o oxigênio e, dessa forma, favorecendo a taxa de respiração e a perda de proteína. (Möhler, 2010)

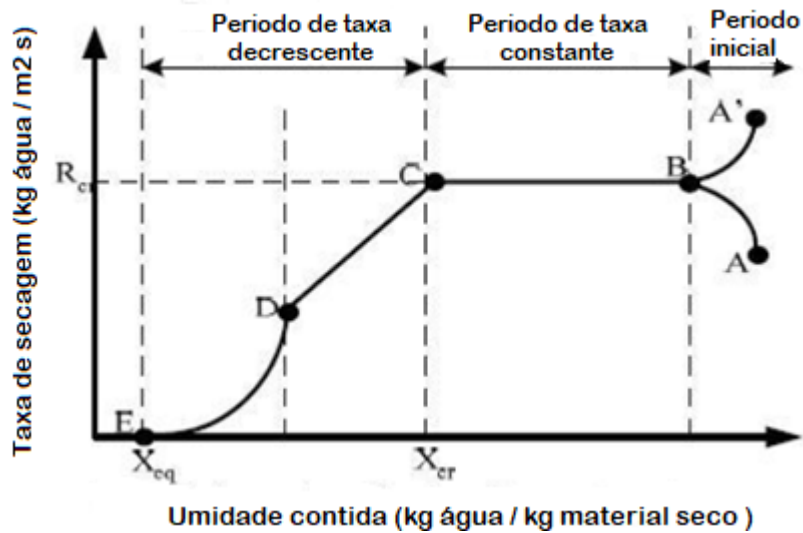
Para evitar o desencadeamento desses fatores é muito importante o estudo e projeto de equipamentos com objetivo de otimizar esses parâmetros. Tal ação necessita a consideração de diversos problemas da mecânica dos fluidos, química de superfície, estrutura dos sólidos e a taxa de transferência de calor e massa. (Santos, 2013)

Frente a essas determinações, Möhler (2010) assume que o processo de secagem apresenta essencialmente quatro fases distintas, que são elas:

- I. Fase inicial ou transitória: É de curta duração e o grão varia sua temperatura até que entre em equilíbrio. Um ponto a ressaltar nesse período é que se a transferência de calor por condução e radiação forem desprezíveis, a temperatura de equilíbrio será a de bulbo úmido.
- II. Período de taxa de secagem constante: Caracterizado por uma película líquida no entorno do sólido que se mantém a medida de sua secagem. Enquanto a água existente na película evapora o grão exala continuamente a umidade existente nas suas cavidades, permitindo a desumidificação constante.
- III. Primeiro período de taxa decrescente: O grão chega a sua umidade crítica ( $X_c$ ), ou também chamado ponto crítico, onde afirma-se que a umidade nos poros do material já se torna escassa e não consegue manter o fluxo hídrico do filme de evaporação. Iniciam as primeiras aparições de regiões secas no produto, o que leva a uma redução na taxa de evaporação.
- IV. Segundo período de taxa decrescente: A película de fluido superficial do grão se extingue e a taxa de evaporação começa a entrar em constante declínio, forçando o transporte de água depender totalmente do gradiente de concentração de umidade. A velocidade e a umidade relativa deixam de apresentar relevância ao processo. (Möhler, 2010)

As fases relatadas podem ser visualizadas na curva de secagem da Figura 5 abaixo, onde A e A' correspondem ao início da variação na taxa de secagem até chegar a temperatura de equilíbrio (B), seguindo com taxa constante até C, onde inicia o período decrescente da secagem em dois estágios, D e E.

Figura 5: Curva de secagem de acordo com suas fases, em função do teor de umidade



Fonte: Adaptado de Freitas, 2016

Porém é importante determinar o teor de umidade que permaneceu no grão após a secagem, pois quanto maior a taxa de água presente no produto, maiores são as chances de degradação. Sendo assim John Bogart (2015) determinou o tempo de armazenagem segura de acordo com as condições de umidade e temperatura de diversas culturas de grãos, incluindo a soja (Figura 6). Sua condição de delimitação do tempo seguro foi a perda de 0,5% de matéria seca causada por fungos, germinação, danos por insetos e respiração.

Figura 6: Gráfico para armazenagem seguro da soja

Temperatura do grão		Umidade do grão (%)									
°C	°F	10	11	12	13	14	15	16	18	20	22
32	90	> 1 ano		251	49	27	16	10	5	4	3
29	85			336	66	36	21	14	7	5	3
27	80				87	47	28	18	9	6	4
24	75				117	63	38	24	12	8	5
21	70				157	85	50	32	16	10	7
18	65				210	113	67	43	22	13	9
16	60				278	150	89	57	28	17	11
13	55					226	134	86	38	22	14
10	50					339	202	130	50	29	19
7	45						303	195	66	37	24
4	40						293	88	48	30	
2	35							115	62	39	

Fonte: Adaptado de John Bogart (2015)

Os parâmetros acima foram plotados como dias permissíveis para o armazenagem de grãos em determinada umidade e a uma faixa de temperatura próxima à ambiente.

### 2.2.2 Ação do calor sobre os grãos

A secagem é uma atividade muito delicada no processamento dos grãos de qualquer espécie, pois esta pode afetar negativamente na qualidade e propriedades do produto, que posteriormente deverá passar por mais processos até chegar a sua forma final. Os principais parâmetros associados a diminuição da qualidade são a umidade relativa, a velocidade do ar de secagem, o sistema empregado, o tempo de secagem e a temperatura atuante. (Bernardes, 2011)

Quando o processo em questão ocorre muito rapidamente, em decorrência de altas temperaturas e altos fluxos de ar, acaba acarretando em um gradiente de umidade muito acentuado entre a superfície e o interior do grão, gerando o surgimento de tensões internas que acabam causando trincas e posteriormente podendo quebrá-lo. (Oliveira, 2008)

Sua exposição à secagem por períodos de tempo muito longos também pode trazer malefícios para sua composição, principalmente através de danos térmicos. Esses danos podem ser a sensibilidade à rancidez (mudança no sabor e aroma) em grãos oleaginosos, a desnaturação das proteínas, alterações nos amidos, escurecimentos advindos da caramelização dos açúcares e sua queima. (Santos. 2013)

Os danos térmicos também podem surgir da secagem com ar muito aquecido bem como no resfriamento muito rápido, como na iniciação do processo a temperaturas ambientes baixas e temperatura do ar secante elevada. Assim há um choque térmico nos grãos pela exposição do calor no produto ainda frio ou pela circulação de ar frio na superfície dos mesmos. As consequências disso podem ser a dilatação e contração rápida do cereal causando rachaduras provenientes das tensões criadas, assim como a evaporação muito repentina e acelerada gera a desnaturação proteica e a formação de crostas nas suas periferias. (Oliveira. 2008)

Outro ponto importante que Botelho et al. (2015) citam em seu experimento com grãos de soja, é a redução linear da massa específica ao longo do aumento da temperatura. As temperaturas utilizadas foram as mais comumente empregadas nesse tipo de processo (40, 50, 60, 70 e 80°C) e foi observado que a massa específica variou de 733,4 kg/m<sup>3</sup> a 40°C para 710,3 kg/m<sup>3</sup> a 80°C. Isso mostra que o produto pode ser amplamente comprometido, pois a massa específica do grão é um dos

parâmetros avaliados para a determinação da qualidade, Pois quanto maior o seu valor, maior será a qualidade da soja.

Entretanto a temperatura está diretamente ligada à taxa de secagem, pois quanto maior o gradiente de temperatura, maior será a taxa. Para haver um bom rendimento e evitar perdas durante a secagem a temperatura deve ser regularmente monitorada por possui uma maior flexibilização no sistema, pelo motivo que em temperaturas baixas não há retirada da água do grão e em condições extremas há a diminuição da qualidade até sua degradação. (Santos, 2013; Santos, 2019)

### 2.2.3 Temperaturas limites de secagem

No processo de secagem, além da umidade relativa, os fatores que mais influenciam no processo são a temperatura e o tempo de exposição dos grãos nas condições determinadas, por este motivo é de suma importância que a massa de grãos seja mantida dentro de limites seguros. (Bernardes, 2011)

Segundo Bernardes (2011) para determinar as temperaturas máximas de secagem, deve-se tomar como referência a temperatura da massa de grãos, onde normalmente os valores máximos ficam em torno de 40 e 43°C. Para o ar aquecido é possível alcançar temperaturas próximas dos 70°C, entretanto é necessário o frequente monitoramento da temperatura da massa de grãos para evitar seu superaquecimento.

A AEGRO (2019) define uma regra muito importante para a manutenção da qualidade durante e após o processo de secagem, sendo a *regra do monitoramento de temperatura e aeração*, onde se faz uma relação da umidade e temperatura para que haja um armazenamento seguro como na Equação 3 a seguir.

$$UR_{ac} + T < 55,5 \quad (3)$$

Em que  $UR_{ac}$  é a umidade relativa do ar (%) e  $T$  a temperatura (°C). A soma destas duas unidades deve permanecer abaixo de 55,5, um valor pré-determinado para um armazenamento mais seguro.

No entanto a temperatura do ar pode variar muito de acordo com o tipo de secador, espécie de grão e a resistência da massa de grãos ao fluxo de ar faz com que se torne necessário o estabelecimento do padrão de temperatura para aquele secador. (Oliveira, 2008)

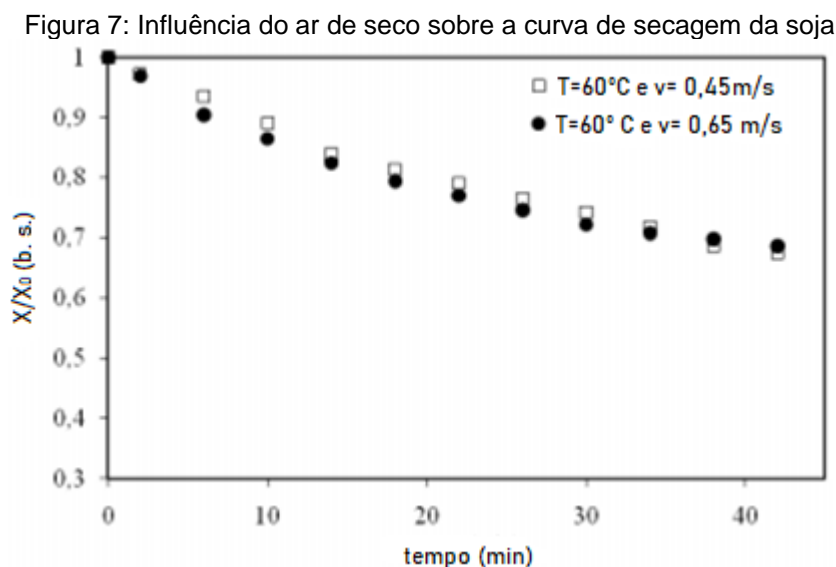


## 2.2.4 Ação da velocidade de ar seco

A velocidade do ar seco também é relevante no processo de secagem por ter forte ligação com a taxa de desumidificação do grão para o ambiente. Portanto, quanto maior a velocidade de ar de secagem, maior será a taxa de transferência de massa de água por convecção para o meio e, dessa forma, diminuindo o tempo de taxa constante de secagem. (Santos, 2013)

Porém quando a secagem chega na taxa decrescente de secagem a influência da velocidade de ar não impacta de forma significativa sobre o grão, pois nesse período a retirada de água se localiza no interior do grão. Então é possível assumir que quanto menor o tempo de taxa constante de secagem, menor será a influência da velocidade de ar. (Santos, 2013)

Para exemplificar a grau de influência do ar seco sobre os grãos de soja, Möhler (2010) realizou aqui um experimento de secagem em duas velocidades diferentes (0,45 e 0,65 m/s) a uma temperatura constante de 60°C, como é apresentado na Figura 7 a seguir.

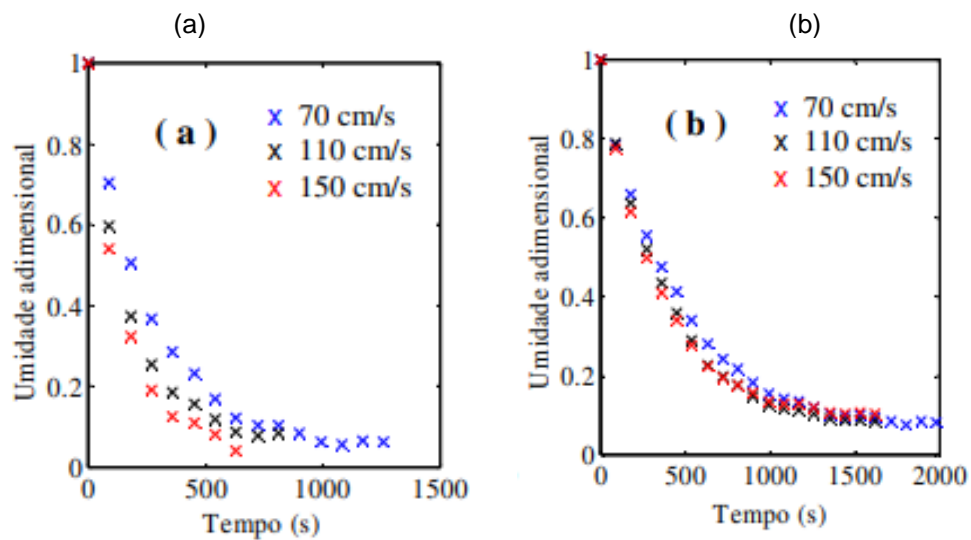


Fonte: Möhler, 2010

Pela Figura 6 é possível visualizar o gráfico da variação da umidade em função do tempo de secagem (min) mostra que as duas velocidades estudadas não disponibilizam mudanças significativas sobre o processo, podendo considerar que as duas curvas se sobrepõem. (Möhler, 2010)

Outro experimento que determina a importância do fluxo do ar de secagem sobre o produto, de acordo com o tempo de processamento, foi realizado por Marcinkowski (2006), o mesmo estudou a secagem em proteína texturizada de soja de dois tipos de geometria: flocos e pedaços. As amostras foram submetidas a três velocidades de ar a uma temperatura constante de 110°C e altura da massa de grãos de 6 cm. Notou-se que a ação da variação do ar de secagem só foi significativa na amostra em flocos (Figura 8.a), diferentemente da curva praticamente paralela na secagem da amostra de granulado (Figura 8.b).

Figura 8: Secagem de duas variantes de proteína de soja



Fonte: Marcinkowski (2006)

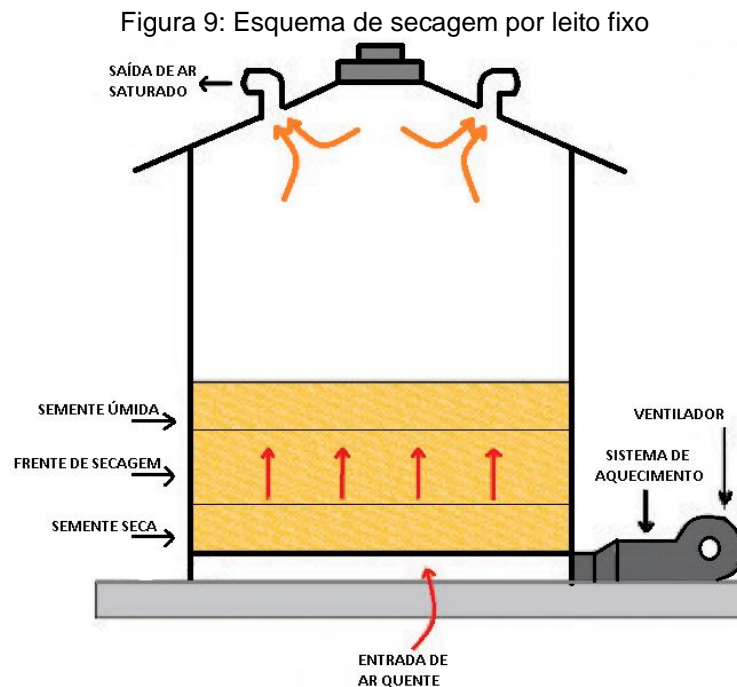
## 2.3 SECAGEM DE GRÃOS

### 2.3.1 Secagem em leito fixo

Também chamado de leito estático, esta forma de secagem consiste no arranjo dos grãos dentro de um espaço confinado de forma que permita a circulação de ar entre os mesmos sem que ocorra seu arraste. A circulação de ar provém, geralmente, de baixo para cima para que haja a dissipação do calor e é o sistema de secagem mais utilizado em silos de pequeno e médio porte (Lima, 1995).

Segundo Albin (2015), os secadores de leito fixo são constituídos por um armazenador cilíndrico de medidas variadas com uma base “falsa” composta de inúmeras fissuras e furos. Acoplada a essa base existe um ventilador ou turbina

responsável pela passagem do ar seco, quente ou frio, entre os grãos. A pressão entregada por essa turbina varia de acordo com o empacotamento e a altura dos grãos armazenados no cilindro, como demonstrado na Figura 9.



Fonte: Adaptado de Peres, 2017

Ainda conforme Albini, é possível considerar que este tipo de secagem atua de acordo com as seguintes condições:

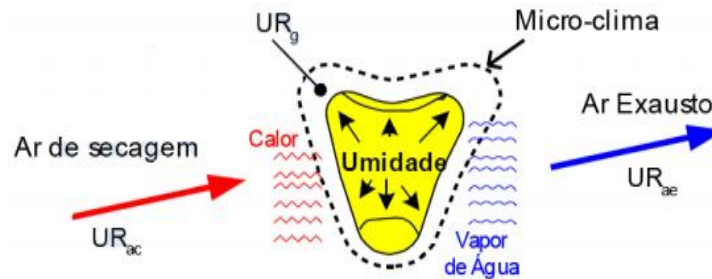
- Fase gasosa: composta por ar quente e vapor de água;
- Fase sólida: grãos úmidos depositados no cilindro;
- Fase líquida: água condensada da fase gasosa, geralmente no topo do aglomerado;

Para explicar esses estados, Silva (2004) afirma que o fato de o produto ser higroscópico faz com que seja formado um microclima no entorno de cada grão (Figura 10), e este é regulado pela sua temperatura e teor de umidade. Dentro das propriedades deste microclima existe a presença da umidade relativa ( $UR_g$ ), que pode ser interpretada como a umidade presente no grão.

Por outro lado, o ar que circunda o aglomerado de grãos também possui a sua umidade relativa, denominada por  $UR_{ac}$ . Entretanto, esta é relacionada com a quantidade de vapor diluído no ar que varia de 0 a 100%, onde quando se encontra em 0% não possui umidade diluída e 100% está no seu ponto de saturação. Sendo assim, é possível tomar as seguintes notas:

1.  $UR_g$  maior que  $UR_{ac}$  ocorre a secagem do produto;
2.  $UR_g$  menor que  $UR_{ac}$  ocorre umidificação dos grãos;
3.  $UR_g$  igual a  $UR_{ac}$  existe equilíbrio higroscópico (não há influência).

Figura 10: Demonstração do processo de secagem



Fonte: Silva, 2005

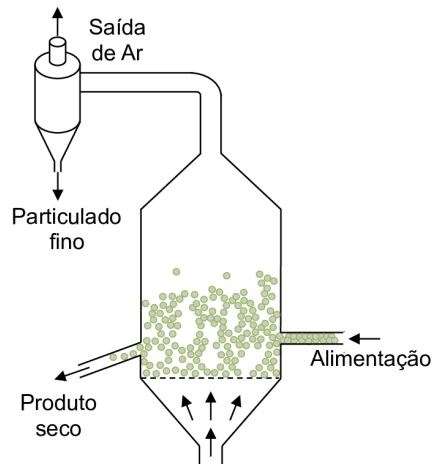
Entretanto, Prado (2004) cita que o sólido não poderá perder uma quantidade de água maior que a umidade de equilíbrio higroscópico, pois será essa umidade que determinará o teor de umidade mínimo que o grão pode apresentar. Tomando conhecimento dessa particularidade é possível adotar a utilização da camada fina, que entendesse como uma camada uniforme de grãos completamente exposta à frente de secagem e com gradientes de temperatura e umidade desprezíveis (Altino, 2019).

### 2.3.2 Secagem em leito fluidizado

Os secadores de leito fluidizado, de processo contínuo ou de batelada, são muito utilizados nas indústrias químicas, alimentícias, farmacêuticas e agrícolas, em partículas de diâmetro entre 50  $\mu\text{m}$  e 2 mm (Alcântara, 2003). Seus componentes são basicamente iguais aos do leito fixo, onde apresenta um cilindro vertical com uma base porosa por onde há a passagem de ar. (Silva, 2004).

O fundamento principal da secagem por leito fluidizado, de acordo com Freitas (2016), é a agitação dos grãos em meio ao fluido, no caso ar ambiente. Esta configuração faz com que os gradientes de temperatura, de pontos com muita atividade ou estagnação do produto sejam reduzidos, oferecendo um maior contato do sólido com o fluido e aumentando a taxa de transferência de calor e de massa, como demonstrado na Figura 11.

Figura 11: Secador de leito fluidizado

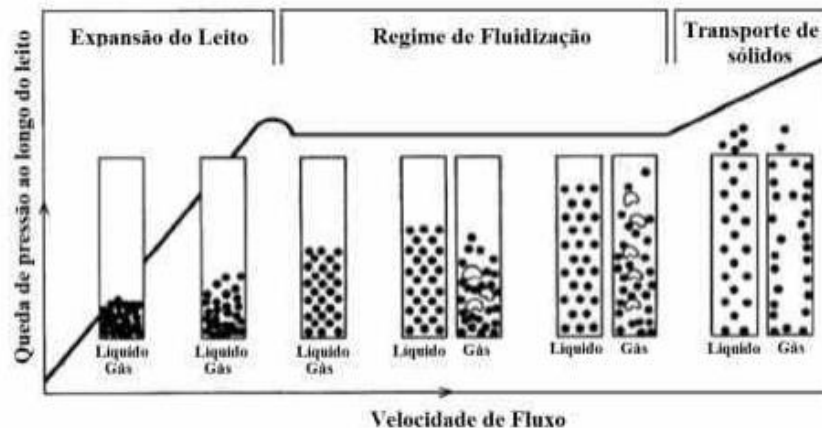


Fonte: Freire, 2019

O termo fluidização vem da assemelhação da agitação do produto com o gás com o aspecto de ebulição de um líquido. Isso se dá pois o fluxo de fluido entra no compartimento de secagem com pressão e velocidade suficiente para suspender a massa de grãos e promover uma maior circulação de ar. Entretanto essa velocidade não pode ser excessiva a ponto de o gás carrear os grãos (Figura 12).

- Se a velocidade for muito baixa o fluido percorre canais entre os grãos, perdendo pressão e energia (leito fixo);
- Com velocidade controlada o fluido permite a reorganização dos grãos, de forma que exista menor resistência na sua passagem e maior contato com o produto;
- Já com velocidades muito altas, é possível analisar a perda de contato das partículas e entram em um aspecto de ebulição. (Freitas, 2016)

Figura 12: Queda de pressão X Velocidade de fluxo



Fonte: Santos et al., 2019

Se o fluxo de ar no secador for muito baixo, o mesmo não apresenta pressão suficiente para o levante dos grãos, não havendo a fluidização. Entretanto com o aumento da velocidade do ar as partículas começam a entrar em constante agitação, definindo assim a velocidade mínima de fluidização. (Santos et al., 2019)

Com essas determinações, é possível analisar algumas vantagens e desvantagens desse processo de secagem: (Alcântara, 2003)

Vantagens:

- 1 - Maior contato gás-sólido, aumentando a velocidade de secagem;
- 2 – Produto mais uniforme, por ocorrer uma melhor mistura entre as partículas;
- 3 – Temperatura uniforme, permitindo maior controle do processo;
- 4 – Taxa de transferência de calor e massa com maior eficiência;
- 5 – Facilidade na introdução e retirada do produto do armazém secador.

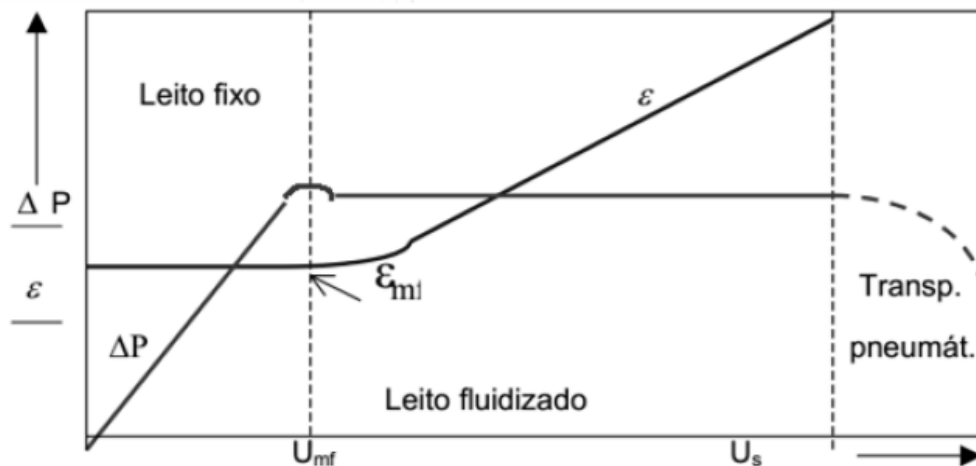
Desvantagens:

- 1 – Grande perda de pressão, gerando uma alta demanda energética;
- 2 – Elevada erosão do armazém e dos vasos;
- 3 – Dificuldade do direcionamento do ar seco;
- 4 – Faixa de tamanho das partículas pequena;
- 5 – Possível formação de aglomerados de partículas.

## 2.4 COMPARATIVOS DE EFICIÊNCIA

A diferença de um leito fixo e de um leito fluidizado é nítida no arraste dos grãos, sendo que o leito fixo não possui pressão suficiente para compensar o peso da massa de produto. Características físicas mostram que o principal motivo desse fenômeno é devido a velocidade do fluido, por haver o equilíbrio das pressões do ar e da massa de grãos no secador fluidizado. Dessa forma, a Figura 13 expõem o ponto da velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) e da porosidade ( $\varepsilon_{mf}$ ), que delimitam o limite da transição de leito fixo para leito fluidizado podem ser definidos de acordo com a variação de pressão no secador ( $\Delta P$ ).

Figura 13: Variação na velocidade e na porosidade de acordo com a pressão



Fonte: Freitas, 2016

Com a velocidade e a pressão o fluxo de ar aumentando consecutivamente no secador, o regime que até o momento se via como um leito fixo laminar, passa a se tornar turbulento. Esse fenômeno diminui a resistência da inércia dos sólidos, fazendo com que os mesmos fluidizem. (Santos et al., 2019)

Segundo Vieira (2012), a melhor configuração para obter maior eficiência é gerar a melhor taxa de secagem, para a maior quantidade de grãos e ainda contar com um melhor aproveitamento energético. Para o experimento que Vieira realizou, com grãos de linhaça em leito fixo e fluidizado com parâmetros de temperatura em  $80^{\circ}\text{C}$  e altura de grãos de 5 cm, o leito fluidizado apresentou dados muito próximos ao leito fixo, não disponibilizando grandes ganhos de eficiência e inutilizando o uso de um maior fluxo de ar.

Entretanto a secagem em leito fluidizado trás maiores resultados na aplicação em sementes, pois como Borba et al. (2018) relatam em seus experimentos essa técnica foi a que mais trouxe resultados na manutenção da capacidade de germinação do produto. Os dados colhidos por Borba et al. mostram que em todas as análises feitas em leito fluidizado as chances de germinação dos grãos foram superiores aos 95% estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Neste capítulo é abordada a metodologia de pesquisa do problema em questão, para projeto e construção do protótipo, a determinação dos instrumentos de medição, e escolha de variáveis do processo que foram utilizadas para avaliar a remoção de umidade dos grãos.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA SECAGEM DOS GRÃOS DE SOJA

#### 3.1.1 Determinação da umidade da amostra

Um grão, como qualquer produto alimentício ou de extração mineral, deve possuir sua taxa de umidade mínima para poder cumprir seu papel e não perder suas características. Dentro deste contexto é necessário conhecer o menor valor de umidade presente no grão ao final da secagem, em que essa taxa é dependente da espécie do produto, da variedade, do grau de maturidade das condições prévias que o grão foi submetido.

Para isso, é necessário conhecer o equilíbrio higroscópico do grão em questão. Esse conceito é importante pois ele regula o limite de redução de água no conteúdo do produto para determinadas temperaturas e umidade relativa. No caso da soja, que é uma oleaginosa, sua umidade de equilíbrio é relativamente menor se comparada a grãos com altos índices de amido ou proteínas nas mesmas condições.

A umidade de equilíbrio higroscópico dos produtos agrícolas pode ser definida por diversos modelos matemáticos disponíveis na literatura, onde o escolhido para o experimento foi a equação modificada de Henderson (Equação 4) por disponibilizar dados precisos.

$$U_e = \{\ln(1 - a_w) / [-a \cdot (T + b)]\}^{1/c} \quad (4)$$

Em que  $U_e$  é a umidade de equilíbrio higroscópico (b.s.) (%),  $a_w$  a atividade da água (0 a 1),  $T$  como a temperatura (°C) e as variáveis  $a, b, c$  consideradas de acordo com o material analisado. Sendo que de acordo com Tonello et al. (2013) os parâmetros da equação para a soja são:  $a = 30,5327E-5$ ,  $b = 134,136$  e  $c = 1,2164$ .

De acordo com Möhler (2010) o teor de umidade de um grão pode ser expresso em base úmida ou em base seca. O teor de umidade em base úmida é representado pela massa de água do produto sobre sua massa total, conforme a Equação 5 abaixo.



$$U_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_t} \quad (5)$$

Onde  $U_{bu}$  é o teor de umidade em base úmida (%),  $m_{H_2O}$  é a massa de água presente nos grãos (kg) e  $m_t$  é a massa total do produto, massa de água mais massa de produto seco (kg).

Já o teor de umidade de base seca é expressado da seguinte forma. (Equação 6)

$$U_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (6)$$

Em que  $U_{bs}$  é o teor de umidade de base seca (%),  $m_{H_2O}$  é a massa de água do produto (kg) e  $m_{ms}$  é a massa de matéria seca (kg).

Conhecido o teor de umidade dos grãos pode-se estimar o tempo de armazenamento seguro de acordo com a Figura 6, de forma que já é possível gerar uma projeção de preservação dos grãos com maior qualidade.

### 3.1.2 Demanda energética do secador

Como já é de conhecimento, a temperatura é uma grande aliada à secagem de produtos agrícolas por aumentar a taxa de secagem e diminuir o tempo de operação, entretanto dependendo do manejo desse parâmetro, pode se tornar um risco para os grãos por gerar quebras, afetar as propriedades químicas e até inutilizá-los. Por isso é muito importante possuir um bom controle sobre o gradiente de energia presente no processo.

Tem-se o conhecimento de que a temperatura máxima da soja durante a secagem permanece ao redor de 40 a 43°C, mas é necessário saber a quantidade de energia para manter a massa de produto em uma temperatura próxima do estipulado. Para isso Ruivo (2018), desenvolveu em sua pesquisa uma sequência de cálculos matemáticos. As equações utilizadas e sua determinação são listadas abaixo.

– Energia necessária para aquecer a massa de grãos até sua temperatura final de acordo com a temperatura do ar seco:

$$\frac{q}{m} = C_{ps}(T_f - T_a) \quad (7.1)$$

Sendo,

$q$ , energia na forma de calor;

$m$ , massa de grãos;

$C_{ps}$ , calor específico do sólido;

$T_f$ , temperatura final do produto;

$T_a$ , temperatura do ar de alimentação.

Para determinar o  $C_{ps}$ , Defendi et al. (2015) estabelece uma equação formulada a partir das propriedades da soja, apresentando-se como a Equação 8:

$$C_{ps} = 0,391 + 0,461 \cdot \left( \frac{Y_a}{100 + Y_a} \right) \quad (7.2)$$

– Energia para elevar a temperatura da água no produto através do ar de alimentação até a temperatura de vaporização por unidade de massa.

$$\frac{q_2}{m} = Y_a \cdot C_{pl}(T_v - T_a) \quad (7.3)$$

Em que,

$Y_a$ , umidade inicial dos grãos (b.s.);

$C_{pl}$ , calor específico da água;

$T_v$ , temperatura de vaporização;

– Calor latente do fluido evaporado em função da massa.

$$\frac{q_3}{m} = \lambda(Y_a - Y_f) \quad (7.4)$$

Na qual,

$\lambda$ , calor de vaporização do fluido;

$Y_f$ , umidade final do grão (b.s.).

Onde o calor de vaporização é estabelecido de acordo com Silva et al. (2013), que determina a seguinte equação:

$$\lambda = (597,6 - 0,57 \cdot T_a) \cdot [1 + 0,324 \cdot \exp(-13,917 \cdot Y_a)] \quad (7.5)$$

Dessa forma é possível escrever a função da energia requerida para secar a massa de grãos da seguinte forma:

$$\frac{q}{m} = C_{ps}(T_f - T_a) + Y_a \cdot C_{pl}(T_v - T_a) + (Y_a - Y_f) \cdot \lambda \quad (7.6)$$

### 3.1.3 Cálculo de energia a ser fornecida pelo resistor

Já se sabe que o principal objetivo a se obter em um secador de grãos é a remoção de umidade, portanto quanto maior a taxa de secagem, mais eficiente é o processo. No entanto é importante conhecer a eficiência energética do processo, pois um equipamento que possui ótima taxa de remoção de água, mas com um consumo muito elevado não corresponde a um sistema totalmente eficiente para o proprietário.

Com esse intuito, foi calculado o consumo total de energia em todos os ensaios analisados. Como não se possuía um voltímetro próprio para a avaliação de tensão entregue ao resistor, foi anotada a posição do controlador do potenciômetro para os respectivos experimentos. Sabendo a potência máxima entregue à fonte de calor, foi possível determinar o consumo de energia a partir da Equação 8.

$$C = n.P.t \tag{8}$$

Sendo,

$C$  – Consumo de energia (kWh);

$n$  – Quantidade de energia fornecida (0 a 1);

$P$  – Potência total do resistor (kW);

$t$  – Tempo de operação (horas).

### 3.1.4 Pressão X Velocidade de ar

A velocidade de ar seco possui influência direta na transferência de calor, aumentando a taxa de transferência por convecção. Em contra partida a retirada de umidade dos grãos por meio de convecção só tem papel importante durante o período de taxa constante de secagem, onde há um maior percentual de água nas periferias do sólido.

Por isso é necessário estabelecer uma corrente de ar de alimentação considerável, tendo em vista que um bom dimensionamento resulta na diminuição do tempo de secagem. Para realizar a medição da velocidade do ar foi inserido um Tubo de Venturi no tubo. A partir do diferencial de pressão provocado pela restrição no diâmetro da tubulação, que provoca uma variação na altura do líquido manométrico, é possível utilizar a Equação 8 para calcular a velocidade do ar.

$$V = \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{A_1^2}{A_2^2}\right) - 1}} \quad (9)$$

Onde,

$V$  – Velocidade do fluido;

$h$  – Diferença de altura;

$g$  – Gravidade;

$A_1$  – Área da seção maior;

$A_2$  – Área da seção menor.

Possuindo o valor da velocidade, calcula-se a vazão de ar presente na seção de trabalho utilizando a Equação 9.

$$Q = A_t \cdot V \quad (10)$$

Em que,

$Q$  – Vazão;

$A_t$  – Área transversal da tubulação.

Para obtenção dos dados foram utilizadas duas colunas manométricas de saída vertical acoplados em diferentes locais. A primeira foi fixada na seção inicial do conjunto e possui a pressão máxima do sistema, a segunda coincide com a câmara de aquecimento por possuir uma geometria de maior seção. Esse fator promove uma queda de pressão, que é incógnita da equação.

### 3.1.5 Altura de grãos no secador

Um parâmetro relativamente importante na secagem de grãos e que oferece assistência à velocidade de ar e sua temperatura é a altura da massa de produto, pela redução da resistência oferecida pela camada de produto na passagem do ar, e consequentemente reduzindo o tempo de secagem. No sistema de secagem por fluidização também há um expressivo avanço no tempo de operação, entretanto a delimitação da altura correta também traz maior facilidade em atingir o ponto de fluidização e com menor vazão.

Porém para que haja uma quantia considerável de produto em secagem com uma camada estreita foi necessário aumentar o diâmetro do secador, implicando na

necessidade de aumentar a capacidade de geração de fluxo. Assim, com base em outros autores, nas proporções utilizadas por eles, foi determinado que a melhor condição de secagem se encontra entre 2,5 e 4 cm de altura, em função dos equipamentos disponíveis e a obtenção de resultados em um período de tempo baixo.

### 3.1.6 Umidificação dos grãos de soja

Como já é de conhecimento, a melhor faixa de umidade presente na massa de grãos para armazenagem está entre 10 e 11%. A amostra obtida de um produtor da região de noroeste do estado já havia passado por processo de secagem, sendo necessário determinar a umidade restante nos grãos. A determinação foi realizada em triplicata com a pesagem de 5 g de soja em placas de petri com seus pesos previamente conhecidos. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa com temperatura ajustada em 105°C, durante o período de 4 horas. As amostras foram retiradas da estufa e pesadas. Em seguida elas voltaram à estufa por mais 1 h e novamente pesadas. Esse procedimento foi repetido até que se obtivesse massa constante, constatando uma umidade de 8,69% (b. s.).

Desta forma foi verificada a necessidade de hidratar novamente os grãos de soja, que consistiu no estabelecimento de uma massa de grãos inicial, sendo 1000 g, seguido da exposição da amostra a um ambiente com vapor de água abundante.

A geração desse vapor de água foi proveniente de um aquecedor possuindo água líquida a uma temperatura constante de aproximadamente 100°C, sendo acomodada a amostra em um recipiente vazado localizado acima do fluxo de vapor. Foram realizadas pesagens em um intervalo de 20 minutos, até que a massa possuísse uma proporção de absorção de água relativamente alta, podendo facilitar a visualização das curvas de secagem posteriormente.

### 3.1.7 Procedimento padrão para os experimentos

Os experimentos estabelecidos foram conduzidos com a mesmas características de análise de massa, temperatura e umidade para que houvesse uma maior aproximação dos reais valores entregados em cada sistemática.

Para a avaliação da temperatura e umidade dos experimentos, inicialmente foi observada a temperatura e umidade do ar seco alimentado no sistema ao grão sem a presença de restrições de passagem do mesmo. Posteriormente, durante a realização

do experimento em questão, os parâmetros foram verificados num intervalo de 10 minutos por meio da fixação do sensor externo do higrômetro a uma altura de 80 mm da coluna de grãos.

A análise da redução de massa também seguiu a mesma regra, havendo medições consecutivas em intervalos de 10 minutos, sendo retirado o cilindro secador do bocal de saída de fluxo até a verificação da massa na balança de precisão.

A massa de soja úmida foi estabelecida em 200 g, por representar uma altura de produto dentro da faixa pré-estabelecida de 2,5 a 4 cm e garantir que fluxo presente no sistema consiga atingir a fluidização. Fixando a massa inicial dos grãos em 200 g, observou-se uma altura de 3,5 cm na câmara de secagem.

## 3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

### 3.2.1 Cilindro de armazenamento

Para realizar o experimento foi necessário utilizar uma tubulação rígida que mantivesse a pressão, fosse resistente a temperaturas próximas de 70°C e que permite a visualização dos fenômenos envolvidos no processo. A partir desta demanda, pesquisando as opções no mercado de materiais e encontrando uma extrema dificuldade na aquisição de um exemplar de acrílico cilíndrico, optou-se por confeccionar um exemplar utilizando uma chapa de acrílico. A conformação da chapa para uma geometria circular se deu pelo aquecimento do material em um forno à temperatura de aproximadamente 90°C e logo após, a conformação de acordo com o molde de uma tubulação de 100 mm de diâmetro. Para finalizar, as duas extremidades foram unidas com duas careiras de rebites 3,5 mm, o que acabou resultando em um cilindro com as seguintes dimensões: 480 mm de altura, 100 mm de diâmetro e 2,75 mm de espessura, representado na Figura 14.

Figura 14: Cilindro de secagem e armazenagem



Fonte: O autor

Outro ponto importante a salientar é a garantia da presença de pressão suficiente no compartimento, entretanto possibilitando a saída do ar saturado de umidade. Para solucionar esse problema foi utilizado um teto cônico parafusado nas extremidades do cilindro, possuindo neste uma abertura para a expulsão do ar saturado e acesso para acessar os grãos dispostos na base.

### **3.2.2 Turbina de compressão**

Um dos requisitos presentes nos dois tipos de secagem é o sistema de ar mandado, porém o secador fluidizado requer maior gradiente de pressão e velocidade de ar seco. Por esse motivo é de suma importância um sistema que forneça fluxo de ar suficiente para realizar o arrasto dos grãos de soja no cilindro secador.

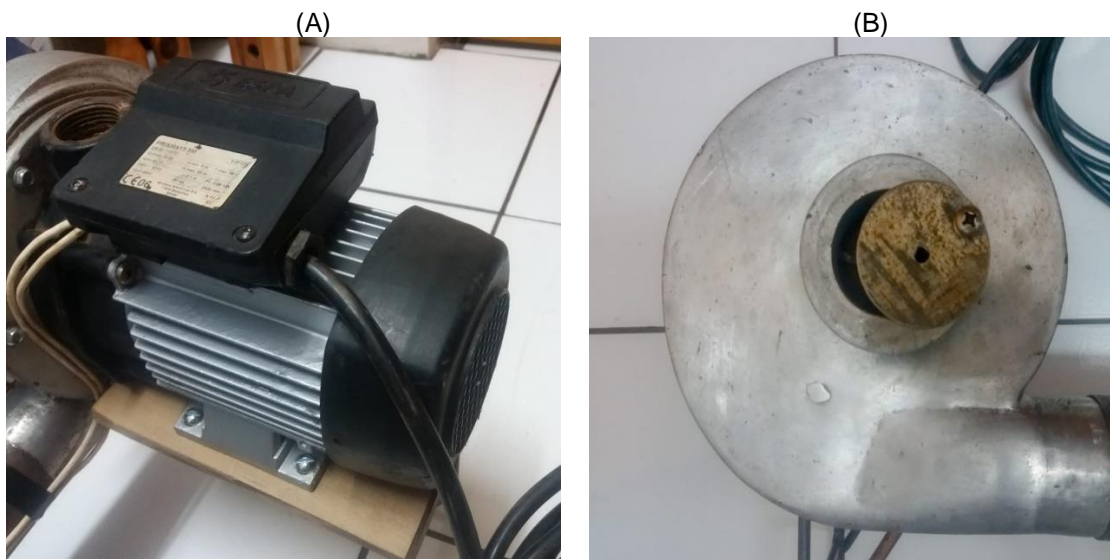
Foram estudados vários métodos de fornecimento de ar e dois desses se mostraram promissores, o método experimental por compressor e a turbina de compressão. A primeira opção é capaz de gerar um fluxo imediato de ar quando a válvula é aberta e é possível haver uma maior concentração de pressão no sistema, mas esse fluxo não se torna constante pois com o frequente escape de pressão do

cilindro do compressor, esta acaba perdendo ação e podendo ocasionar a parada da fluidização.

Já a turbina de compressão não apresenta velocidade e pressão instantâneas ou números capazes de ser iguares aos encontrados no compressor, porém assim que for delimitada a velocidade de fluidização para as condições do sistema, o fluxo é mantido constante durante todo o tempo necessário de secagem.

O sistema construído especialmente para o projeto é constituído de um motor monofásico de 1,3 cv (0,96 kW), 230V e rotação de aproximadamente 3600 rot/min a uma frequência de 60 Hz (Figura 15 – A). O eixo do motor elétrico é acoplado à turbina centrífuga (Figura 15 – B) por meio de um eixo cilíndrico com rolamento, fazendo com que as pás da turbina rotacionem proporcionando o movimento direcional da massa de ar. O controle de vazão é feito pela abertura da entrada de ar na turbina, fracionando a quantidade de ar que é puxado pela mesma.

Figura 15: Motor elétrico PRISMA15 5M (A) e turbina com controle de vazão manual (B)



Fonte: O autor

Para poder medir a vazão entregue seriam utilizados dois manômetros de saída vertical, porém como a pressão exercida pela turbina é baixa, o mercado local não possui equipamentos de baixa escala e os preços dos medidores especiais serem altos, foi escolhido fazer a verificação do fluxo de ar pelo método do Tubo de Venturi. Onde foram fixadas duas mangueiras transparentes, uma na tubulação de 100 mm de seção transversal e a outra a tubulação de 60 mm, possuindo água colorida em seu



interior e em sua extremidade uma seringa fracionada para a comparação das alturas de fluido, como a representação da Figura 16.

Figura 16: Mecanismo de Tubo de Venturi



Fonte: O autor

### 3.2.3 Gerador de calor

Como já citado diversas vezes anteriormente nessa pesquisa, a temperatura é um dos parâmetros indispensáveis para se obter uma secagem com qualidade e tempo satisfatórios, se comparada à secagem em temperatura ambiente. Entretanto para se obter e manter na temperatura indicada pelo tópico 3.1.3 (*Cálculo de energia a ser fornecida pelo resistor*) é de suma importância possuir uma fonte de calor eficiente, com pouca variação e que seja possível ser controlada.

Tendo em vista todos os requisitos de operação, foram testados vários tipos de resistências, mas não satisfaziam as exigências por diversos motivos, sendo por ineficácia na manutenção da temperatura juntamente com o fluxo de ar, variação na temperatura e resistência ao aquecimento em meio ao fluxo. Assim, a resistência escolhida foi um aquecedor de água para máquina de lavar a quente (Figura 17) de marca, potência e características desconhecidas, possuindo 200 mm de comprimento, 45 mm de largura e seção tubular de 6 mm.

Figura 17: Resistência aquecedora



Fonte: O autor

Como era muito importante manter a temperatura desejada constante e não era de conhecimento as características da resistência em questão, foi utilizado um potenciômetro Dimmer (Figura 18) marca Tholz, modelo DMR208N, capacidade máxima de 40 A e controle ajustável. Realizadas as devidas instalações, foi constatado que a potência máxima entregue pelo Dimmer à resistência é de 1066 W a uma corrente de 5,2 A e tensão de 205 V.

Figura 18: Dimmer controlador de tensão



Fonte: Casa Ferreira, 2020

### 3.2.4 Higrômetro

Tendo em vista a importância de um rigoroso controle da temperatura durante o processo de secagem e o conhecimento da umidade relativa atuante no ar de escape em tempo real, buscou-se um equipamento que pudesse realizar essas duas medições nos ambientes de secagem e externo simultaneamente.

Sendo assim, foi realizada uma busca por um aparelho de medição que atendesse os requisitos e tivesse possibilidade de atuar nas condições de temperatura e umidade do sistema. O instrumento que se mostrou com melhores condições de realizar tais medições foi o duplo termo higrômetro da fabricante AKRON, modelo KR48, por possuir escalas dentro dos parâmetros de secagem e possuir sensor de temperatura e umidade para medições fora do equipamento. Sua faixa de medição de temperatura no sensor externo (OUT) é de -50 a 70°C e resolução de 0,1°C, faixa de umidade relativa de 10 a 99% e resolução de 1% em ambos os sensores (Figura 19).

Figura 19: Duplo Termo Higrômetro AKRON



Fonte: O autor

### 3.2.5 Balança de precisão

Para plotar o gráfico de perda de massa do produto na forma de vapor e determinar a curva de secagem foi necessário conhecer cada variação de peso dos grãos durante a operação. Como o grão estará dentro da câmara de secagem e durante a secagem em leito fluidizado ficará em constante movimento, viu-se a necessidade de pesar todo o conjunto da câmara.

Sabendo que seria importante haver uma baixa resolução de medição, optou-se por uma balança de alimentos da marca FEILITE, modelo SF400, escala de peso até 10 kg (quilos) e resolução de 1 g (grama), como mostrado na Figura 20.

Figura 20: Balança de precisão

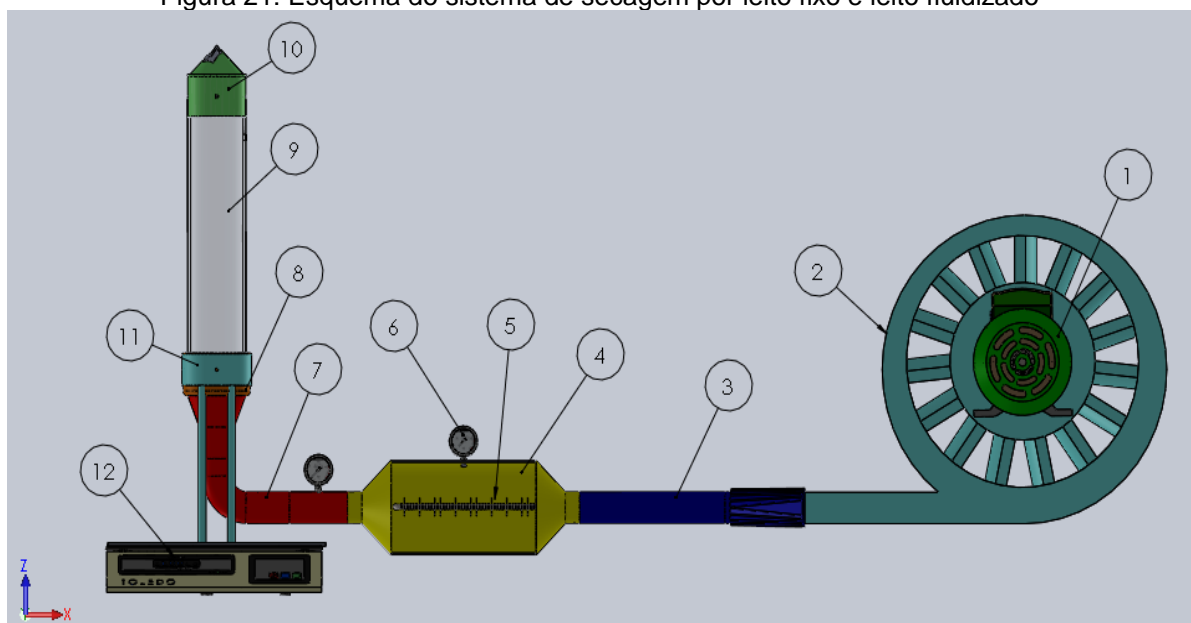


Fonte: O autor

### 3.2.6 Desenho

O modelo de desenho das peças e a montagem dos equipamentos foi inteiramente executado no software de CAD 3D Solid Works na sua versão 2017 para estudantes. Alguns itens foram provenientes do GrabCad Community por download direto da plataforma, como os 1, 5, 6, 12 e uma parcela do 2, pela alta complexidade de desenvolvimento. A Figura 21 demonstra a esquematização do protótipo em modelagem 3D.

Figura 21: Esquema do sistema de secagem por leito fixo e leito fluidizado



Fonte: O autor

Quadro 2: Relação de equipamentos e suas funções no sistema

<b>Nº</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Função</b>
1	Motor elétrico	Fornecer energia mecânica para a turbina na forma de rotação
2	Turbina	Gerar fluxo de ar para o sistema
3	Tubulação de ar frio	Transportar o fluxo de ar ainda frio advindo da turbina
4	Câmara de aquecimento	Acomodar a resistência elétrica e diminuir a pressão do ar
5	Resistência elétrica	Elevar a temperatura do ar em circulação
6	Manômetro vertical	Informar a pressão do fluxo na seção
7	Tubulação de ar quente	Transportar o ar aquecido para o secador
8	Flange peneira	Base da massa de grãos e possibilitar a passagem do ar
9	Cilindro secador	Acondicionar o produto durante a secagem e visualização do processo
10	Tampa do secador	Controlar a pressão no cilindro, proteger do escape de grãos e expulsar o ar saturado
11	Suporte do conjunto secador	Base elevada para o cilindro secador
12	Balança de precisão	Medir a quantidade de água que está sendo expelida

Fonte: O autor

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

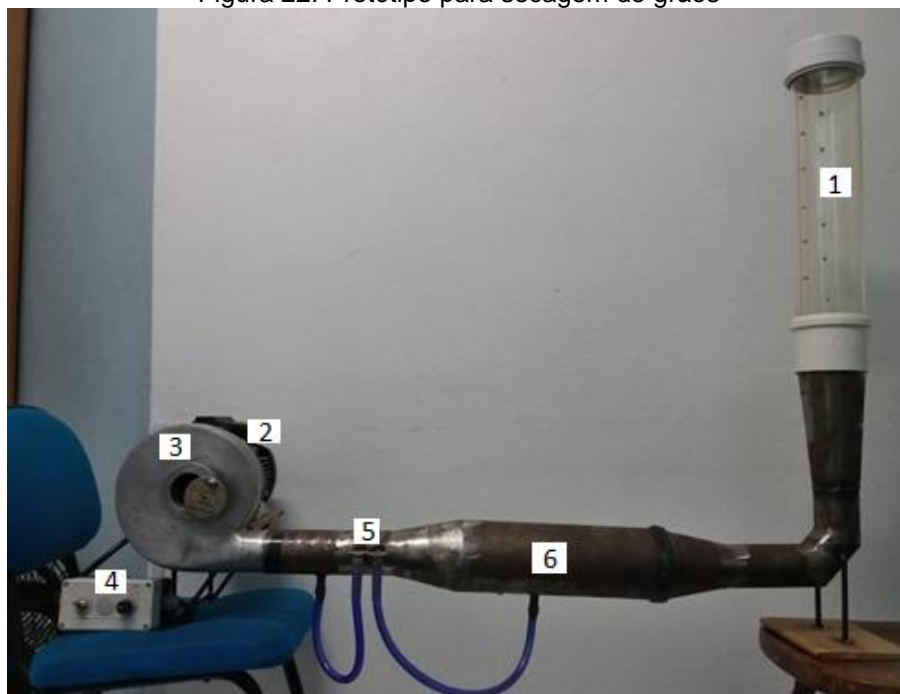
Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes ao projeto e construção do protótipo do sistema de secagem por leito fixo e/ou fluidizado. Além disso serão apresentados os resultados referentes aos ensaios de secagem em diferentes temperaturas e velocidades de ar seco, bem como avaliar os modos de operação. Também serão discutidos alguns parâmetros iniciais, como a determinação da umidade presente na amostra de soja, temperatura necessária para aquecer a massa de grãos, magnitude da faixa de vazão disponibilizada pela turbina e a vazão necessária para a fluidização do produto. Após tomado nota de todos padrões, serão representadas as curvas de secagem encontradas com o leito fixo e leito fluidizado variando seus diversos parâmetros já mencionados.

Encontrados os dados e plotadas as cinéticas de secagem, será possível analisar a melhor configuração de secador, sua viabilidade e a eficiência efetiva de secagem.

### **4.1 PROTÓTIPO CONSTRUÍDO**

O protótipo de secagem (Figura 22) foi construído de acordo com os equipamentos listados na seção acima com recursos próprios e alguns serviços terceirizados (serviço de torno e funilaria de peças).

Figura 22: Protótipo para secagem de grãos



Lista de equipamentos:

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1 – Câmara de secagem            | 2 – Motor elétrico monofásico           |
| 3 – Turbina                      | 4 – Controladores da turbina e resistor |
| 5 – Colunas de fluido com escala | 6 – Câmara de aquecimento (resistor)    |

#### 4.2 AVALIAÇÃO DA VAZÃO DE AR ENTREGUE AO SISTEMA

Como já mencionado anteriormente a faixa de pressão exercida pela vazão presente na tubulação do sistema é de muito baixa intensidade, o que inviabiliza a utilização de instrumentos de medição convencionais, como o manômetro. No entanto foi confeccionado um sistema de medição a partir dos princípios do Tubo de Venturi, onde a partir do funcionamento da turbina e a regulagem de sua entrada de ar foi gerada uma pressão atuante no sistema. O método consistiu na fixação de duas colunas de fluido, no caso água, em dois pontos distintos e de seção da tubulação diferentes, sendo 65 mm para a primeira coluna ( $H_1$ ) e 100 mm para a segunda ( $H_2$ ). Assim, foi possível verificar a diferença de altura dos fluidos nas duas colunas de água (Quadro 3).

Quadro 3: Alturas de fluido na avaliação da velocidade do ar

Posição da regulagem	Altura da coluna de fluido 1 ( $H_1$ ) (mm)	Altura da coluna de fluido 2 ( $H_2$ ) (mm)	Diferença de altura ( $\Delta H$ ) (mm)
Mínima vazão*	35	21	14
Média vazão	33	15	18
Máxima vazão	30	10	20

\* A mínima vazão é regulada pela necessidade de manter a resistência do sistema com ventilação suficiente para evitar seu superaquecimento.

Com os dados obtidos e a partir da equação de Venturi, foram executadas as operações para determinar a velocidade (m/s) e a vazão (m<sup>3</sup>/min). Os resultados dos referidos cálculos podem ser visualizados no Quadro 4.

Quadro 4: Resultados encontrados de velocidade e vazão de ar para os três testes

Diferença de altura ( $\Delta H$ ) (mm)	Velocidade do ar seco (m/s)	Vazão de ar no sistema (Q) (m <sup>3</sup> /min)
14	0,2433	0,114
18	0,2763	0,130
20	0,2915	0,137

### 4.3 CINÉTICAS DE SECAGEM

#### 4.3.1 Experimentos em leito fluidizado

Nesta seção foram analisados os grãos de soja na secagem em quatro diferentes configurações de leito fluidizado, sendo a secagem com mínima fluidização e baixa temperatura (1), mínima fluidização e alta temperatura (2), máxima vazão e baixa temperatura (3) e, máxima vazão e alta temperatura (4). Porém era de grande importância a determinação da vazão de ar seco para proporcionar tal fenômeno (Quadro 3) frente aos parâmetros de massa e altura de grãos no secador, sendo estes 200 g e 35 mm respectivamente.

Quadro 5: Análise de vazão mínima de fluidização

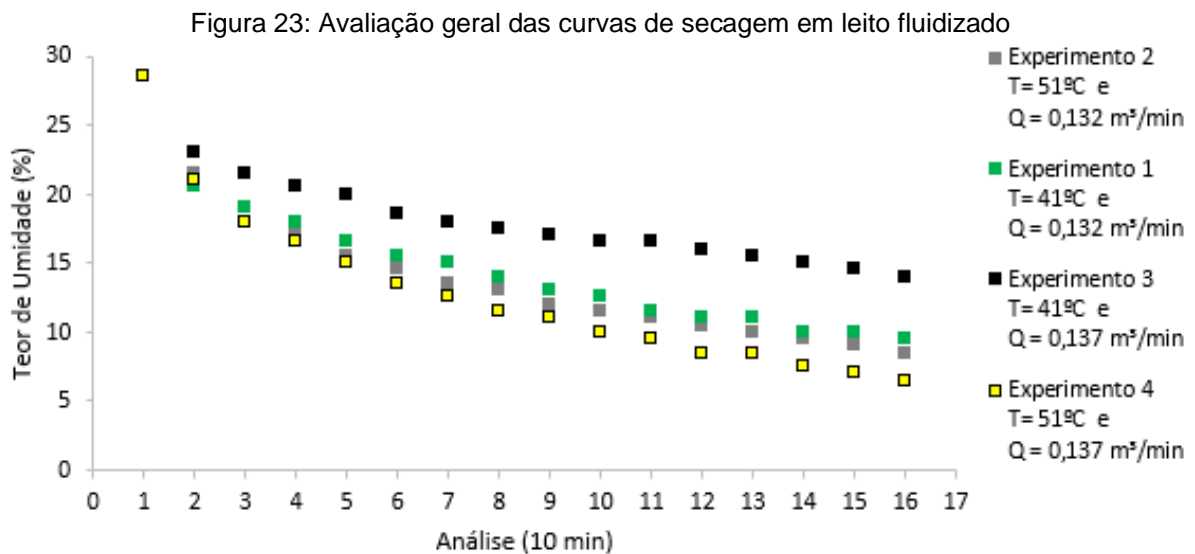
H1 (mm)	H2 (mm)	Velocidade (m/s)	Vazão (Q) (m <sup>3</sup> /s)
32,5	14	0,280	0,1321

Frente ao exposto no Quadro 5, foram conduzidos os experimentos 1 e 2, variando-se apenas o gradiente de temperatura. A fixação das temperaturas de operação do ar seco foi determinada de acordo com a máxima temperatura permissível para que o grão mantenha sua qualidade, chegando assim nas faixas de 41°C para operações de baixa temperatura e 51°C para processamento em temperaturas elevadas. A umidade dos grãos umidificados passou por uma análise de pesagem como relatado no tópico 3.1.6 (*Umidificação dos grãos de soja*) e após secagem total foi obtida uma umidade relativa de 28,5% (b. s.).

Definidos todos os parâmetros necessários teve-se o início dos testes, com análises de massa, temperatura e umidade em intervalos de 10 minutos, resultando



em 16 verificações e 200 minutos de experimento. Os valores de redução de umidade em relação ao tempo para os experimentos podem ser visualizados na Figura 23.



A partir das curvas expostas na figura acima, foi possível concluir que ambas apresentaram comportamentos semelhantes frente às fases de secagem, porém a maior exposição dos grãos do Experimento 2 contribuiu para uma redução mais drástica do teor de umidade e, também, a menor presença de água ao final das análises, podendo quantificar as umidades em 9,5% e 8,5% respectivamente. Porém a faixa de umidade desejada de 10% não apresentou grandes mudanças, sendo alcançada em 120 minutos no Experimento 2 e aos 130 minutos de operação no Experimento 1.

Já nos ensaios 3 e 4 a vazão de ar entregue ao secador foi aumentada para a máxima capacidade do equipamento, obtendo um fluxo de 0,137 m<sup>3</sup>/min no bocal de abastecimento. Para a temperatura buscou-se manter a mesma faixa dos experimentos anteriores, sendo 41 °C para o Experimento 3 e 51 °C para o Experimento 4. Desejando atender esses requisitos, foi necessário aumentar a potência entregue ao resistor, pois havendo uma maior passagem de ar frio pelo sistema também ocasiona uma maior troca de energia térmica com o meio.

Ao analisar as curvas dos experimentos 3 e 4, é possível observar uma nítida diferença de declínio das curvas, bem como uma defasagem dos valores de umidade final, sendo encontrados 14% no Experimento 3 e 6,5% no Experimento 4. Essa defasagem demonstra que a velocidade do ar não interfere significativamente em

todas as fases de secagem, podendo se aproximarem somente na fase inicial, onde a água retirada é proveniente das periferias do grão.

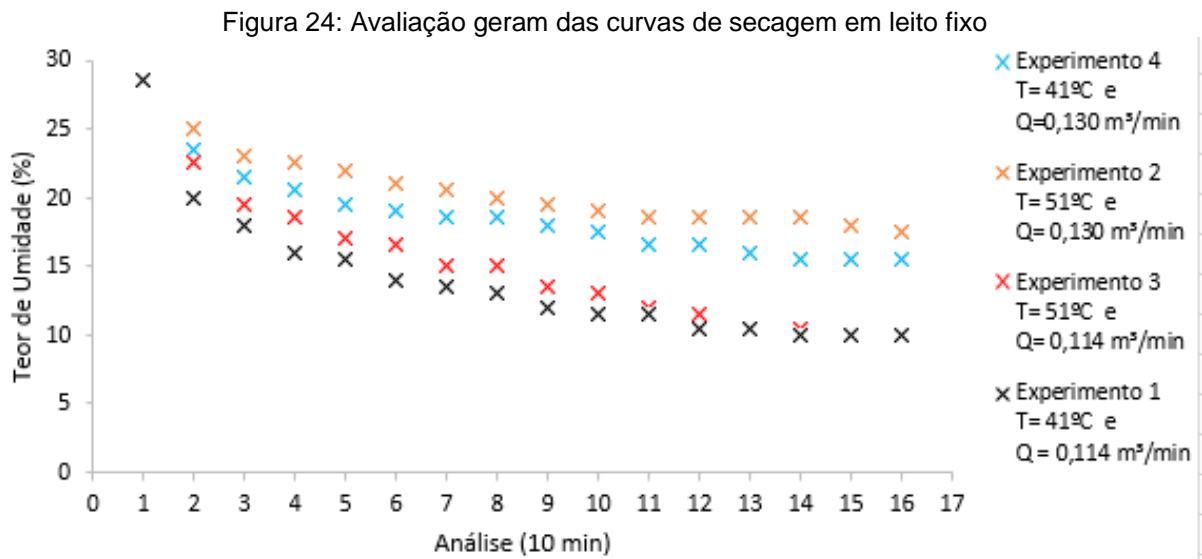
Após a realização de todos os experimentos variando os parâmetros de temperatura e vazão do sistema, foi notável que a temperatura do ar seco é a característica mais importante no processo de secagem e que gera maiores resultados, no entanto seu gradiente não deve exceder as recomendações referentes ao grão processado. Porém o aumento da vazão com temperaturas baixas trouxe resultados negativos ao processo, pois a capacidade de remoção de água do Experimento 1 superou a redução encontrada no Experimento 3 em 5,5% de umidade. Isso se deve pela capacidade do resistor em remover a umidade presente no fluxo de ar, entregando, assim, um ar com maior percentual de água.

#### 4.3.2 Experimentos em leito fixo

O estudo de secagem em leito fixo foi conduzido com o mesmo método de análise do experimento anterior, sendo verificadas as curvas de secagem nas seguintes condições: mínima vazão e baixa temperatura (1), máxima vazão e alta temperatura (2), mínima vazão e alta temperatura (3) e máxima vazão e baixa temperatura (4). As temperaturas aplicadas nos referentes experimentos foi mantida nas mesmas faixas da secagem em leito fluidizado, sendo 41°C para baixas temperaturas e 51 °C para temperaturas elevadas. No entanto as velocidades foram determinadas de acordo com as características do leito em questão e os limites do sistema, pois no caso do ensaio em máxima vazão de ar seco, este não poderia ocasionar o arraste da massa de grãos, ou seja, provocar a fluidização. Já na mínima vazão o fator determinante foi a capacidade de manter o resistor com devida troca de calor com o fluxo, pois caso contrário a mesma poderia super aquecer e prejudicar o funcionamento do equipamento. Sendo assim, os valores de mínima e máxima vazão foram fixados em 0,114 e 0,130 m<sup>3</sup>/min respectivamente.

Definidas todas as constantes de secagem, foram redigidos os respectivos experimentos em leito fixo. A primeira peculiaridade verificada em todas as configurações de secagem foi o rápido aquecimento da massa de grãos no interior do cilindro, diferentemente da secagem em leito fluidizado com alta vazão que demandou um maior tempo para estabilização da temperatura de operação. Outro ponto saliente a relatar é a capacidade de secar o ar injetado, pois em todas as análises realizadas foi constatado um ar na capacidade mínima do instrumento de medição (10%).

Após tomar nota de todas as temperaturas, umidades e massas coletadas nos experimentos, pôde-se redigir as curvas de secagem de acordo com as diretrizes estipuladas para cada ensaio, podendo visualizá-las na representação da Figura 24.



Frente ao exposto nos gráficos de secagem em leito fixo, foi possível observar que a vazão de ar atuante no processo prejudica a performance de retirada de água do grão, pois nos dois experimentos que apresentavam a máxima vazão para o método não atingiram o a marca de umidade estipulada, enquanto os demais experimentos obtiveram êxito. Essa característica pode ser explicada pela formação de uma bolsa de ar quente no bocal de alimentação do cilindro secador, pois a baixa intensidade de fluxo de ar faz com que este se acumule no interior da tubulação, aumentando consecutivamente a temperatura do ar seco a patamares superiores aos inicialmente definidos.

Esta propriedade pode ser considerada negativa, pois se a temperatura do grão não for constantemente monitorada poderá causar a perda de matéria seca do grão, desnaturação da proteína, rachaduras e queima do produto. Entretanto, no quesito velocidade de secagem esta particularidade faz a diferença durante o processo, diminuindo muito o tempo de exposição da massa de grãos ao ar de secagem e possibilitando uma maior redução no seu teor de umidade

#### 4.4 CONSUMO ENERGÉTICO

A demanda energética que deverá ser entregue à massa de soja presente no cilindro secador foi calculada de acordo com as equações listadas no tópico 3.1.2 (*demanda energética do secador*) e com a determinação de altura da massa de grãos, sendo fixada uma massa de 200 g de soja úmida com a altura de 3,5 cm.

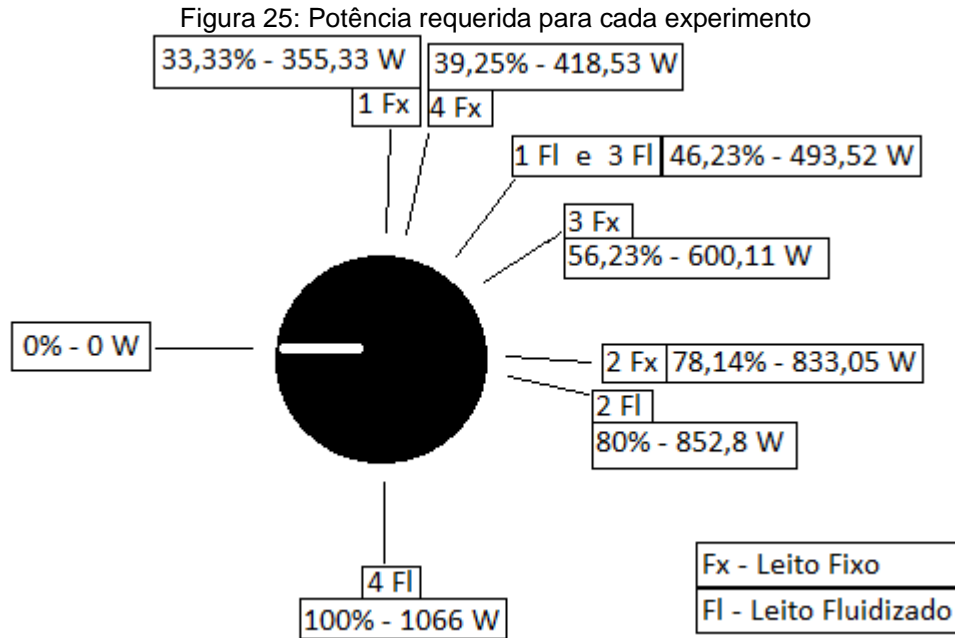
Para a realização dos cálculos, primeiramente foram buscadas algumas variáveis necessárias na bibliografia e as demais foram determinadas de acordo com as medições nos experimentos, principalmente sobre outras análises semelhantes e algumas constantes do produto, onde são representados no Quadro 6.

Quadro 6: Determinantes para cálculo de energia para o sistema

Variáveis	Resultados
$C_{ps}$	0,493245 cal/g°C
$T_f$	40 °C
$T_a$	51 °C
$Y_a$	28,5%
$C_{pl}$	1,00 cal/g°C
$T_v$	100°C
$\lambda$	568,53 J/kg
$Y_f = U_e$	10%

Ao estipular todos os dados necessários para a realização das equações propostas, calculou-se a energia para aquecer a massa de grãos até sua secagem completa, chegando a um valor de aproximadamente 1,7289 KJ para testes em 51 °C e 3,285 kJ para análises em 41 °C.

Porém como o estudo requer a variação do fluxo de ar que alimenta o sistema, a demanda energética do resistor para atingir os valores de temperatura estabelecidos é aumentada ou diminuída de acordo com o caso avaliado. O emprego de potência à fonte de calor foi imposto pelo potenciômetro interligado ao sistema elétrico do protótipo, podendo variar a tensão em escala de 1 V (Figura 25).



Já para o cálculo de potência consumida pela turbina não foi possível se obter valores pertinentes, pois a variação do fluxo foi realizada mecanicamente, de forma que a entrada de ar fosse parcialmente restringida. Portanto a energia consumida pelo motor monofásico se manteve constante e em potência máxima em todos os testes, sendo possível fixar a potência de 0,96 kW.

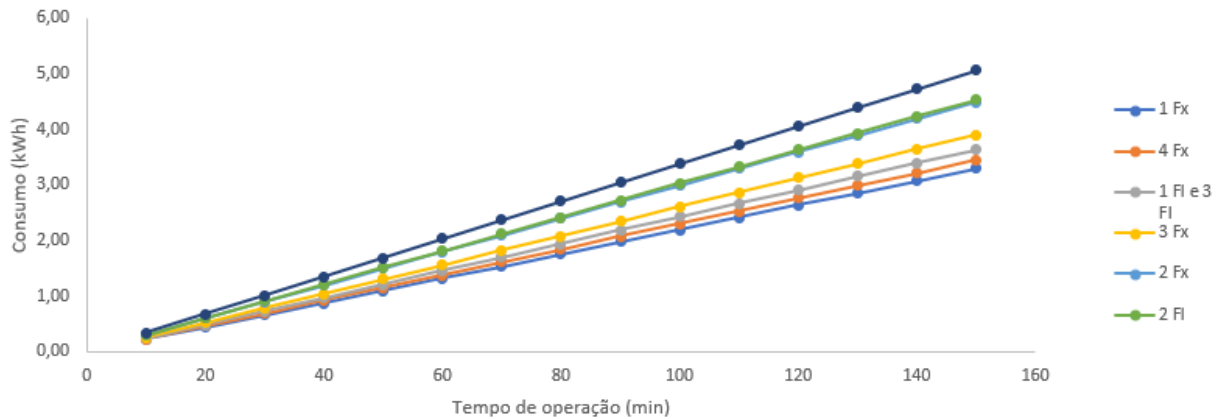
Depois de conhecer todas as potências utilizadas nos ensaios, obteve-se o gráfico de energia acumulada durante todo o processo (Quadro 7 e Figura 26).

Quadro 7: Dados parciais de consumo de energia

Experimento	Potências requeridas (resistor + turbina) kW	Potência ao longo do tempo (kWh)	
		Tempo (min)	Energia (kWh)
1 Fx	1,3153	10	0,2192
		80	1,7538
		150	3,2883
4 Fx	1,3785	10	0,2298
		80	1,8380
		150	3,4463
1 Fl e 3 Fl	1,4535	10	0,2423
		80	1,9380
		150	3,6338
3 Fx	1,5601	10	0,2600

		80	2,0801
		150	3,9003
2 Fx	1,7930	10	0,2988
		80	2,3907
		150	4,4826
2 FI	1,8128	10	0,3021
		80	2,4171
		150	4,5320
4 FI	2,026	10	0,3377
		80	2,7013
		150	5,0650

Figura 26: Diferença de consumo de energia



No Quadro 5 bem como no gráfico da Figura 34 de energia consumida pelo protótipo, é possível analisar que os experimentos que possuíam maior temperatura sobre os grãos tiveram consumo mais elevado, pela necessidade de aumento da potência do resistor. No entanto, grande parte destes também chegaram à umidade requerida (10%) mais rapidamente, enquanto outros nem se aproximaram.

Ao dispor de todos os dados relativos aos ensaios, foi possível analisar qual a configuração de secagem mais eficiente para cada tipo de leite, comparando os parâmetros utilizados e avaliando a taxa de remoção de umidade da massa de grãos e a energia consumida até atingir a umidade proposta, como é exposto no Quadro 8.

Quadro 8: Ensaios com maior eficiência

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Remoção de umidade (%)	Tempo de processamento (min)	Consumo de energia (kWh)
4 FI	51°C	0,2915	22	90	3,0390
1 Fx	41°C	0,2433	18,5	130	3,1493

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO**

---

### **5.1 CONCLUSÕES**

A partir da pesquisa realizada sobre a secagem de grãos de soja, dimensionou-se e posteriormente foi construído um protótipo que atendesse as necessidades de vazão e temperatura para ambas as configurações estudadas: leito fixo e leito fluidizado. Durante a construção foi necessário realizar algumas alterações de projeto, como a introdução da balança sob a plataforma da câmara de secagem, entretanto seu funcionamento satisfaz os objetivos esperados de vazão e temperatura.

As cinéticas de secagem apresentaram algumas particularidades já esperadas, no entanto a velocidade do ar de seco se mostrou pouco influente sobre a retirada de umidade próximo a fase decrescente de secagem. Em contra partida, a temperatura apresentou significativa participação na redução de umidade, influenciando na velocidade de secagem e na capacidade de remoção da água contida no interior da soja.

Porém, para se obter uma maior temperatura e vazão é necessário injetar uma maior quantidade de potência aos equipamentos, dessa forma a utilização do leito fluidizado pode ficar inviável se a posterior utilização e valor agregado do grão no mercado não for compensatório.

### **5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

Analisar em microscópio óptico amostras aplicadas aos diferentes métodos de secagem;

Melhorar o sistema de vazão para dispor de um maior controle;

Avaliar a utilização de micro-ondas no aquecimento do produto.



## REFERÊNCIAS

AEGRO, **Secagem e armazenamento de grãos: diferentes tipos e seus custos**. Disponível em: [blog.aegro.com.br/secagem-e-armazenamento-de-graos/](http://blog.aegro.com.br/secagem-e-armazenamento-de-graos/). Acessado em 05/09/2020.

BARONI, G. D.; BENEDETI, P. H.; SEIDEL, D. J.. Cenários prospectivos da produção e armazenagem de grãos no Brasil. Passo Fundo/RS, v. 14, n. 4, p. 55-64, 2017. Disponível em: <http://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/thema/article/view/452>. Acesso em: 10 ago. 2020.

BARROS, João; FREIRE, José. Secador em leito de jorro com agitador mecânico. Pág. 262, mai. 2019.

BERNARDES, I. **Temperatura para secagem intermitente de sementes de soja**. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

FREIRE, J; ALBINI, G. **Tópicos especiais em sistemas particulados**, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, v. 5, n. 1, p. 160, Maio de 2019.

FREITAS, R. P. **Estudo experimental e da simulação da secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em leito fluidizado**. Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2016.

GONÇALVES, Leidiane Cardoso. **Avaliação química e tecnológica de grãos de soja para elaboração e caracterização de tofus**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: [sidra.ibge.gov.br/tabela/6588](http://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588). Acessado em 20/04/2020.

JÚNIOR, A. N. S. **Eficiência energética em sistemas de aeração de silos de armazenagem de grãos, utilizando inversores de frequência**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2004.

LIMA, Ana Claudia Camargo. **Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995. OPI – Advancing Grain Storage Management. **Armazenamento Seguro.** Disponível em:

[www.advancedgrainmanagement.com/learn-grain-management/safe-storage/#safe-storage-charts](http://www.advancedgrainmanagement.com/learn-grain-management/safe-storage/#safe-storage-charts). Acessado em 03/10/2020.

MANDARINO, J. M. G. Composição química média da soja e valor nutricional das suas proteínas. 2017.

MARCINKOWSKI, Emmanuelle de Almeida. **Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/13433>. Acesso em: set. 2020.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para Pré-Processamento de Grãos**. Pelotas: Editora Gráfica Universitária da Universidade Federal de Pelotas, 2002. v. 200. 206p.

MÖHLER, Bruno Cardozo. **Avaliação das características de secagem dos grãos de soja**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

NAKA, Sheizi. **Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona 'guarani' visando armazenagem em silos verticais**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

OLIVEIRA, M. B. **Efeito de diferentes operações de secagem e armazenagem na qualidade de duas cultivares de soja (*Glycine Max (L.) Merril*)**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

PERES, W; Peske, S. SECAGEM DE SEMENTES – Tipos de secadores. **Revista SEEDnews**, v. 20, n. 6, dez. 2016.

RUIVO, T. D. **Secagem de soja: determinação de difusividade e da porosidade do grão**. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

SANTOS, Maycon Douglas Vieira. **Análise da secagem de grãos de milho em secador de fluxos mistos instalado em uma agroindústria**. Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental – Universidade Federam do Mato Grosso, Rondonópolis, 2019.

SANTOS, Cláudia Destro dos. **Avaliação das melhores condições de secagem de grãos de soja visando à manutenção do teor de proteínas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO - SIEPE, 10º., 2018, Santana do Livramento. **Estudo comparativo de secagem de cevada (*Hordeum vulgare L.*)** [...]. Santana do Livramento: Universidade Federal do Pampa, 2018. 5 p.

VIEIRA, Gustavo Nakamura Alves. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum L.*) em leite fixo e fluidizado**. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.