

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE**  
**FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL**

**Herbert Tunnermann**

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE UM**  
**EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DA VAGEM VERDE DE SOJA E**  
**SEUS RESÍDUOS**

Passo Fundo

2018

**Herbert Tunnermann**

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE UM  
EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DA VAGEM VERDE DE SOJA E  
SEUS RESÍDUOS**

Orientador: Prof. Dr. Jose Antonio Portella

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2018

Herbert Tunnermann

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE UM  
EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DA VAGEM VERDE DE SOJA E  
SEUS RESÍDUOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 26 de setembro 2018.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Jose Antonio Portella  
Orientador

Professor Doutor Márcio Walber  
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Antonio Carlos Valdiero  
Universidade da UNIJUI

Professor Doutor Sandro Borba Possebon  
Instituto Federal Farroupilha IFFAR

*Dedico este trabalho a Deus, minha amada  
esposa e meus queridos filhos*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pai, que esteve sempre ao meu lado e com certeza me acompanhou e me iluminou em todos estes passos, assim como outros, tão importantes na minha vida.

A minha esposa Suzana e meus filhos Rodolfo e Rodrigo, pelo amor, carinho, compreensão, dedicação, paciência e especialmente, por estar ao meu lado, dando-me forças para concluir este trabalho.

É indispensável agradecer também aos profissionais que me auxiliaram com muita dedicação como o Professor Dr. Jose Antonio Portella, por orientar este trabalho, pela amizade, confiança e incentivo na realização de mais essa etapa. Aos demais professores que me deram grandes contribuições sobre demais conteúdos e a este trabalho. Ao Sr. Edson Schaefer, Diretor Presidente da empresa Joscil, pelas grandes contribuições ao trabalho.

A empresa Joscil Equipamentos para Cereais, pela oportunidade de desenvolver um estudo sobre este projeto e pelo fornecimento das informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

A Universidade de Passo Fundo cujos conhecimentos lá obtidos, me foram à base técnica necessária para esta dissertação.

Muito Obrigado!

*As espécies que sobrevivem não são as mais fortes, nem as mais inteligentes, e sim aquelas que se adaptam melhor as mudanças.*

*Charles Darwin.*

## RESUMO

A antecipação da colheita e a maturidade desuniforme da soja resultam em uma grande quantidade de vagens verdes colhidas junto com as vagens secas. Grande parte destas vagens são segregadas na máquina de pré limpeza e outra parte acaba sendo armazenada junto com os grãos em silos e armazéns. Grãos ou vagens verdes contem mais umidade do que grãos maduros, afetando a qualidade de armazenagem devido a possibilidade de contaminação por fungos e bactérias. O índice de acidez e teores de clorofila aumentam em função do percentual de vagens verdes, o que acarreta em aumentos de custos nos processos de refino de óleo e de produção de produtos proteicos. Por outro lado, existe a possibilidade de reaproveitamento desta vagem que não foi trilhada na colheita, com um foco em resultados financeiros e de qualidade na armazenagem. Com este objetivo, realizou-se uma pesquisa dos equipamentos e processos de secagem existentes e seus parâmetros de dimensionamento para a secagem da vagem verde de soja e seus resíduos. A grande dificuldade da secagem de vagem verde e seus resíduos, além do alto teor de umidade, é garantir um fluxo contínuo durante a secagem devido a facilidade de ocorrer o “embuchamento” deste produto durante seu deslocamento no interior do secador. O dimensionamento do equipamento é baseado nas leis da termodinâmica para atingir uma capacidade de 6 toneladas por hora reduzindo a vagem verde e seus resíduos de 31% para 18%. Os dimensionamentos relevantes para o estudo são a temperatura do ar de secagem e sua vazão, diâmetro, comprimento e rotação e ângulo do tambor. Conforme dimensionado neste estudo, observa-se que uma vazão do ar de secagem de 68.500 m<sup>3</sup>/h a uma temperatura de 80 graus centígrados, pode-se reduzir a umidade de 31% para 18%, para uma capacidade de 6 toneladas por hora. Para esta situação o diâmetro do tambor deve ser de 2,4 metros e ter um comprimento de 18 metros e, este tambor rotativo deve estar a 6 rotações por minuto e estar inclinado a 5 graus para que o tempo de residência do produto em contato com o ar de secagem seja de uma hora. Com estes parâmetros de secagem e dimensões do secador, os resultados obtidos atendem a capacidade esperada, sendo possível realizar a secagem da vagem verde de soja e seus resíduos no modelo e dimensões do secador selecionado

Palavras-chave: Secagem. Secadores. Resíduos de soja. Secador rotativo. Armazenagem de grãos.

## ABSTRACT

The early harvest and the irregular maturity of soybeans result in a high number of green pods harvested along with dry pods. A great portion of these pods is separated in the pre-cleaner and the rest is stored with the grains in silos and warehouses. Green grains or pods contain more humidity than mature grains, which affects storage quality due to the potential contamination by fungi and bacteria. The acidity ratio and chlorophyll content increase because of the percentage of green pods, which results in cost increases for the processes of oil refining and production of protein products. On the other hand, there is a possibility of reusing the pods that were not threshed in the harvest, focusing on storage quality and financial results. Therefore, a research was performed on existing drying equipment and processes, and their sizing parameters for drying green soybeans and their residues. The great difficulty of drying green pods and their residues, besides the high humidity content, is to ensure a continuous flow during the drying process, because it is easy to occur "plugging" when this product is moving inside the dryer. Equipment sizing is based on thermodynamic laws to achieve a capacity of 6 tons per hour, reducing the green pods and their residues from 31% to 18%. The significant sizing for the study are drying air temperature and flow rate, diameter, length and rotation, and drum angle. The sizing performed in this study shows a drying air flow rate of 68,500 m<sup>3</sup>/h at a temperature of 80 degrees centigrade, and humidity may be reduced from 31% to 18% for a capacity of 6 tons per hour. For this condition, the drum should have 2.4 meters of diameter and 18 meters of length, and this rotating drum should be set at 6 rotations per minute and inclination of 5 degrees so that the dwelling time of the product in contact with the drying air is one hour. According to these drying parameters and dryer dimensions, the results obtained provide the capacity expected, allowing to dry the green soybeans and their residues in the model and dimensions of the dryer selected.

Keywords: Drying. Dryers. Soybean residue. Rotating dryer. Grain storage.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cultivo de soja de 2007 a 2017.....	20
Figura 2 – Mapa brasileiro do cultivo de soja .....	21
Figura 3 – Produção mundial de soja safra 2017/2018 .....	21
Figura 4 – Vagem verde com dois e três grãos.....	22
Figura 5 –Classificação da vagem verde de soja .....	23
Figura 6 – Gráfico psicrométrico da temperatura de equilíbrio do milho .....	26
Figura 7 – Gráfico de calor específico da vagem verde de soja .....	27
Figura 8 – Gráfico da condutividade térmica da vagem verde de soja .....	27
Figura 9 – Gráfico da difusividade térmica da vagem verde de soja .....	28
Figura 10 – Curva de secagem do milho e do trigo .....	32
Figura 11 – Secador de camada horizontal .....	37
Figura 12 – Secador de fluxos cruzados .....	37
Figura 13 – Secador de fluxos contracorrentes .....	38
Figura 14 – Secador de fluxos concorrentes .....	39
Figura 15 – Secador em cascata de fluxos mistos .....	40
Figura 16 – Secador rotativo .....	41
Figura 17 – Secador de leito fluidizado .....	41
Figura 18 – Gráfico psicrométrico .....	47
Figura 19 – Mistura de duas massas de ar .....	48
Figura 20 – Ponto de coleta da vagem verde e seus resíduos.....	53
Figura 21 – Forno para secagem da vagem de soja e seus resíduos .....	54
Figura 22 – Vagem de soja e resíduo de soja .....	54
Figura 23 – Balança de precisão .....	55
Figura 24 – Recipiente para medição de densidade .....	55
Figura 25 – Secador rotativo agrícola .....	57
Figura 26 – Secador rotativo Industrial .....	58
Figura 27 – Secagem por contato direto e indireto .....	59
Figura 28 – Fluxo do secador com torre de cavaletes e de colunas .....	60
Figura 29 – Fluxograma para determinação da quantidade de água removida e tempo de secagem .....	63
Figura 30 – Fluxograma para dimensionamento do equipamento .....	66

Figura 31 – Medição do percentual de umidade .....	67
Figura 32 – Medição da densidade .....	68
Figura 33 – Área de contato para secagem .....	69
Figura 34 – Área de contato para secagem modificada.....	70
Figura 35 – Protótipo para avaliação dos suspensores.....	71
Figura 36 – Distribuição do produto pelos suspensores.....	71
Figura 37 – Inclinação do tambor e variação da rotação.....	72
Figura 38 – Secador de vagem verde e seus resíduos em coluna .....	78
Figura 39 – Princípio de movimentação do produto .....	79
Figura 40 – Alimentação e distribuição da entrada do produto .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros A, B e C para calcular calor latente de vaporização .....	25
Tabela 2 – Amostras da quantidade de vagem de soja .....	29
Tabela 3 – Percentual de vagem recebida e retrilhada .....	30
Tabela 4 – Dimensionamento dos parâmetros de secagem .....	74
Tabela 5 – Cálculo das dimensões do secador .....	76
Tabela 6 – Sistemática de cálculo de um fabricante de secador e fornalhas .....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IAPAR	Instituto Agronômico do Paraná
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
ANFAVEA	Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores
COAMO	Cooperativa Agropecuária Mourãoense
CENTREINAR	Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
Ap	Área ocupada pelo produto
As	Área da seção circular do tambor
Al	Área livre da seção do secador
B	Constante da dimensão do produto
BU	Bulbo Úmido
°C	Graus centígrados
Cea	Calor específico da água
Cep	Calor específico do produto
Cl	Calor latente da água
das	Densidade absoluta do ar seco
Dp	Dimensão do produto (diâmetro)
dva	Densidade absoluta do vapor de água
h	Entalpia
J	Joule
K	Quilo
KCal	Quilo caloria
kg	Quilograma
L	Comprimento
m	Metros
mas	Massa do ar seco
mase	Massa de ar seco na entrada
mar	Massa de água removida
mf	Massa final
mi	Massa inicial
mva	Massa do vapor de água
mvae	Massa de vapor de água na entrada do secador (antes da massa do produto)
mvas	Massa do vapor de água na saída (após secagem)
mvar	Massa do vapor de água removida na secagem
N	Rotação do tambor (RPM)
n	Número de elemento de volume

p	Perda
P	Pressão atmosférica
pe	Peso específico do produto
pv	Pressão parcial do vapor de água
pvs	Pressão do vapor de água saturado
qm	Vazão mássica
Qas	Vazão do ar de secagem
Qc	Quantidade de calor
Qcf	Quantidade de calor com fator de perda
Rm	Razão de mistura
Rme	Razão de mistura do ar de entrada
Rms	Razão de mistura após a secagem
T	Temperatura de bulbo seco
Tip	Temperatura inicial do produto
tr	Tempo de residência do produto com o ar de secagem
Ts	Temperatura do ar de secagem
ts	Temperatura de bulbo seco
tsec	Tempo de secagem
tu	Temperatura de bulbo úmido
Ue	Umidade de equilíbrio
Uf	Umidade final
Ui	Umidade inicial
UR	Umidade relativa
Uras	Umidade relativa do ar de secagem
vas	Velocidade do ar de secagem
Ve	Volume específico do ar seco
Vel	Velocidade do ar de secagem
vl	Volume livre
vp	Volume de produto
vs	Volume do secador
$\eta$	Rendimento
$\acute{\alpha}$	Ângulo de inclinação do tambor

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Justificativa .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>19</b>
1.2.1 Ojetivos especificos .....	19
<b>1.3 Estrutura do trabalho .....</b>	<b>19</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Soja no Brasil e no mundo .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Vagem verde de soja e seus resíduos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 Qualidade da vagem e dos grãos verdes .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 Propriedade da vagem verde e seus resíduos.....</b>	<b>24</b>
2.4.1 Densidade, porosidade e umidade .....	24
2.4.2 Calor específico, sensível e latente .....	24
2.4.3 Temperatura de equilibrio .....	25
2.4.4 Propriedades térmicas .....	26
<b>2.5 Viabilidade do aproveitamento .....</b>	<b>28</b>
<b>2.6 Introdução do processo de secagem .....</b>	<b>30</b>
<b>2.7 Sistemas de secagem .....</b>	<b>33</b>
2.7.1 Secagem natural .....	33
2.7.2 Secagem artificial .....	34
<b>2.8 Clasificação dos secadores .....</b>	<b>35</b>
2.8.1 Quanto as suas características .....	35
2.8.2 Quanto ao fluxo do produto e do ar .....	36
<b>2.9 Propriedades do ar natural e do ar de secagem.....</b>	<b>42</b>
<b>2.10 Dimensionamento dos parametros de secagem .....</b>	<b>43</b>
2.10.1 Teor de umidade no produto.....	43
2.10.2 Propriedades do ar de entrada .....	44
2.10.3 Propriedades do ar de secagem.....	45
2.10.4 Quantidade de água removida na secagem.....	48
<b>2.11 Dimensionamento da secagem pelo método de Milman.....</b>	<b>49</b>
<b>2.12 Tempo de residência do produto durante a secagem .....</b>	<b>50</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1 Coleta de amostras .....</b>	<b>52</b>

<b>3.2</b>	<b>Determinação do teor de umidade .....</b>	<b>53</b>
<b>3.3</b>	<b>Determinação da densidade .....</b>	<b>55</b>
<b>3.4</b>	<b>Seleção do secador .....</b>	<b>56</b>
3.4.1	Secadores de vagens adaptados no mercado .....	56
3.4.2	Considerações para seleção do secador .....	59
<b>3.5</b>	<b>Procedimento metodológico para dimensionar o equipamento de secagem .....</b>	<b>60</b>
3.5.1	Temperatura e vazão do ar de secagem .....	61
3.5.2	Diâmetro, comprimento, rotação e velocidade .....	63
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Teor de umidade da vagem verde e seus resíduos de soja .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2</b>	<b>Densidade da vagem verde e seus resíduos de soja .....</b>	<b>68</b>
<b>4.3</b>	<b>Dimensionamento do secador rotativo e seus detalhes .....</b>	<b>68</b>
4.3.1	Suspensores .....	69
4.3.2	Ângulo de inclinação e rotação .....	72
4.3.3	Definição dos parâmetros de secagem .....	73
4.3.4	Definição das dimensões do tambor rotativo e do tempo de residência .....	74
<b>4.4</b>	<b>Sugestões para desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>78</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>trabalhos futuros .....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os produtores estão constatando um aumento no número de plantas de soja com maturação desuniforme, o que se reflete em folhas, hastes e vagens verdes durante a colheita, mesmo depois da lavoura alcançar sua maturidade. Esse problema tem se refletido principalmente na indústria, pois as vagens verdes embucham o sistema de recebimento e, além disso, a clorofila presente nos grãos verdes escurece o óleo e aumenta os custos da produção (EMBRAPA, 2014).

O resíduo de soja oriundo da máquina de pré limpeza, segundo Bergamaschine et al. (1999), é a mistura de fragmentos de plantas, grãos quebrados, imaturos, atacados por insetos e/ou doenças e/ou intempéries, “ardidos”, sementes de plantas invasoras, vagens que não foram trilhadas, e parte de casca dos grãos de soja que se soltam após a secagem dos grãos.

A redução do tempo de ciclo destas plantas, deficiente controle do ataque de pragas e antecipação da operação de dessecação em relação ao estágio de desenvolvimento da cultura, podem ser fatores que a cada safra vem agravando o problema do excesso de vagens verdes no momento da entrega da soja para as unidades armazenadoras.

O resíduo da soja classificado na máquina de pré limpeza pode representar de 1 a 3% (média de 2%) do peso total recebido pelas unidades beneficiadoras. Fatores como umidade no momento da colheita, nível de infestação da lavoura por plantas daninhas e a regulagem das colhedoras, interferem na composição física e na quantidade dos resíduos de soja.

Na pesagem da carga, durante o recebimento da soja pelas unidades de beneficiamento e armazenagem, a vagem verde e seus resíduos não são totalmente quantificados e descontados do produtor, podendo gerar prejuízos caso este não esteja sendo contabilizado.

Do ponto de vista econômico, segregar, secar e trilhar novamente a vagem que não abriu durante a colheita e assim fazer o aproveitamento normal deste grão, tem um retorno financeiro que justifica um investimento neste processo.

Para o dimensionamento deste equipamento foi necessário coletar amostras durante a colheita, com o objetivo de determinar a umidade e densidade da vagem verde de soja e seus resíduos, utilizados como base para o dimensionamento do equipamento.

Com base no levantamento destes dados de campo e dos equipamentos existentes no mercado, este estudo propõe-se a dimensionar as principais características de um secador como, por exemplo, vazão e temperatura do ar de secagem, diâmetro, comprimento rotação e

inclinação, para um equipamento que se adapte a secagem da vagem verde de soja e seus resíduos oriundos da máquina de pré limpeza.

### **1.1 Justificativa**

A antecipação da colheita da soja e sua maturidade desuniforme resultam em uma determinada quantidade de vagens verdes, que não são trilhadas adequadamente, sendo enviadas para as unidades armazenadoras junto com os grãos secos. Na chegada à unidade de armazenagem e beneficiamento acontece a classificação, onde é retirada a amostra para a determinação da umidade e impurezas presentes na soja. Nesta classificação não se consegue mensurar o total de vagens verdes que vem na carga e nem mesmo aproveitar os grãos contidos nela (IAPAR, 2014). Para que se obtenha o aproveitamento deste grão que fica no interior da vagem é necessário secar e trilhar novamente.

A vagem verde de soja não debulhada é classificada como impureza no embarque de soja para indústria. Para a classificação de soja vinda diretamente da lavoura, os coletores de amostra mecanizados avaliam a composição dos resíduos, mas não avaliam a quantidade de vagem presente na carga. Depois das moegas, as máquinas de pré limpeza descartam as vagens verdes de soja como impurezas que podem então ser secadas e passadas por uma batidora de cereais para a retirada dos grãos da vagem verde (IAPAR, 2014). Caso este processo de retilhagem não seja feito, haverá uma perda considerável para a unidade armazenadora no descarte desta impureza.

A safra de soja para 2018, segundo a CONAB, está prevista em torno de 104 milhões de toneladas. Tomando-se, como referência, que 1,5 % desta safra sejam resíduos classificados na máquina de pré limpeza e limpeza final, resultam num total de 1,56 milhões de toneladas em resíduos que podem ser aproveitados gerando resultados financeiros positivos para as unidades de armazenagem e aos produtores.

Os sistemas de secagem existentes no mercado nacional não permitem a secagem da vagem verde de soja e seus resíduos em grandes volumes, conforme pesquisa realizada com os fabricantes de equipamentos para secagem de cereais e leguminosas.

Baseando-se nesta necessidade de mercado busca-se o dimensionamento de um sistema de secagem de vagem de soja verde e seus resíduos que atendam esta necessidade e que possam trazer resultados financeiros na utilização comercial do grão após a retilha da vagem verde.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia de cálculo para dimensionar um equipamento para secagem da vagem verde de soja e seus resíduos, oriundas da máquina de pré limpeza, com capacidade de 6 toneladas por hora reduzindo a umidade média relativa de 31% para 18%.

### 1.2.1 Os objetivos específicos:

- Pesquisar os processos e sistemas de secagem existentes e sua classificação;
- Avaliar a umidade e densidade da vagem verde de soja e seus resíduos;
- Selecionar um modelo de secador para dimensionar;
- Fabricar um protótipo para teste dos suspensores.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Neste primeiro capítulo apresenta-se uma introdução sobre o estudo, seus objetivos e a justificativa para escolha desta dissertação. No segundo capítulo é apresentada uma revisão da literatura, abordando os volumes de produção de soja e local que se encontra a sua produção no Brasil, assim como os equipamentos existentes para secagem e sua base teórica para o dimensionamento. Ainda no segundo capítulo serão apresentadas as propriedades e os problemas relacionados na armazenagem da vagem verde.

Em materiais e métodos, capítulo 3, é apresentada a sistemática da coleta de amostras, metodologia utilizada para sua medição e os secadores existentes para seleção e dimensionamento do equipamento adequado ao projeto de secagem da vagem verde de soja e seus resíduos.

O capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões obtidos sobre a umidade e densidade da vagem verde de soja e seus resíduos. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes ao dimensionamento dos parâmetros de secagem e dimensões principais do equipamento selecionado.

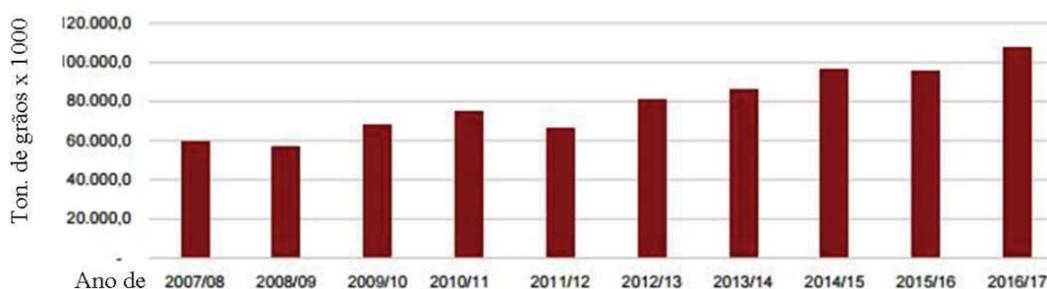
## 2 REVISAO BIBLIOGRÁFICA

A cadeia produtiva do agronegócio vem se difundindo cada vez mais, sendo necessário o desenvolvimento de equipamentos cada vez maiores e sofisticados. A revisão bibliográfica permite consultar o que já existe no mercado para usar como referência nos estudos realizados. Busca-se neste capítulo analisar os equipamentos existentes na área de secagem bem como as propriedades do produto em questão e seu dimensionamento.

### 2.1 Soja no Brasil e no mundo

O complexo soja, composto pelos seus derivados como óleo e farelo de soja, foi o principal produto exportado em 2016, representando 13,72% de toda a exportação brasileira, ou seja, US\$ 25,42 bilhões, ficando à frente de produtos importantes como minérios, petróleo e combustíveis, sendo o Brasil o maior exportador de soja mundial (CONAB, 2017). A Figura 1 ilustra a evolução do cultivo de soja em milhões de toneladas no período de 2007/2008 a 2016/2017.

Figura 1 – Cultivo de soja de 2007 a 2017



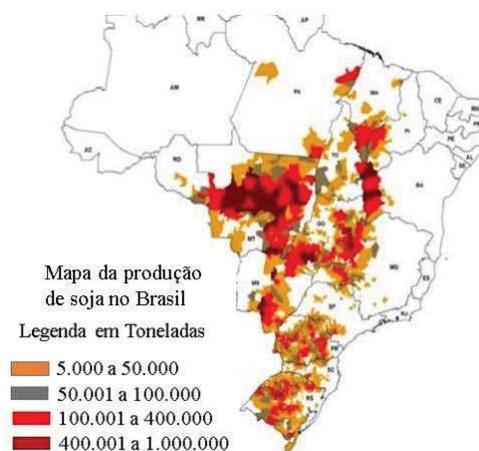
Fonte: Adaptado de CONAB 2017.

Segundo a CONAB, em seu relatório do mês de julho de 2017, para a safra já colhida 2016/17, o Brasil produziu aproximadamente 113,93 milhões de toneladas de soja em grãos, valor 19,38% maior que os 95,43 milhões de soja em grãos produzidos na safra 2015/16. Dois fatores foram fundamentais para este incremento de produção, um deles é pelo aumento de área, estimado em 1,9%, passando de 33,25 milhões de hectares para 33,89 milhões de hectares, mas o fator de maior impacto foi o aumento na produtividade de aproximadamente 17%.

Os principais estados produtores da safra 2016/17, conforme ilustrado na Figura 2 são: Mato Grosso, com 26,8% da produção (30,51 milhões de toneladas); Paraná, com 17,1% da

produção (19,53 milhões de toneladas); Rio Grande do Sul, com 16,4% (18,71 milhões de toneladas); e Goiás, com 9,4% (10,82 milhões de toneladas).

Figura 2 – Mapa brasileiro do cultivo de soja

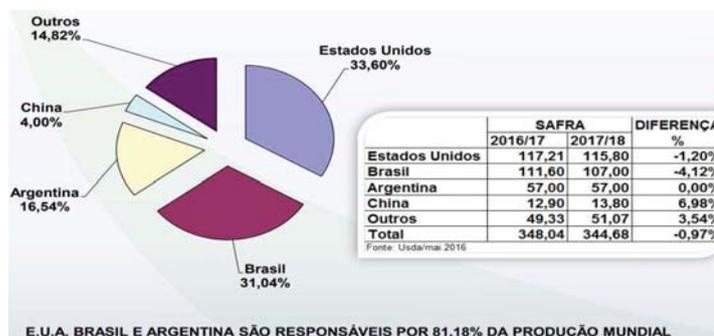


Fonte: CONAB, 2017.

Segundo estimativa da CONAB, em sua última divulgação do quadro de oferta e demanda mundial referente ao mês de julho/2017, foi estimado para a safra mundial de soja em grãos 2017/18: EUA (33,60%), Brasil (31,04%) e Argentina (16,54%), responsáveis por 81,18% de toda a produção mundial de soja em grão e a China por 63% de todas as importações mundiais (CONAB, 2017).

Para a safra mundial 2017/18, conforme ilustrado na Figura 3, estima-se que a produção mundial de soja esteja em cerca de 344,68 milhões de toneladas, valor 0,97% menor que o estimado na safra 2016/17, de 348,04 milhões de toneladas (CONAB, 2017).

Figura 3 – Produção mundial de soja safra 2017/2018



Fonte: CONAB, 2017

O aumento populacional e a conseqüente demanda maior por alimentos, fez com que houvesse um maior investimento na área agrícola. “A luta do homem na rude lida do campo e

na busca da produtividade agrícola, vem desde 8.000 anos antes de Cristo, quando desenvolve técnicas e cria seus primeiros instrumentos com paus e pedras” (ANFAVEA, 2006). Desde então as práticas e métodos de produção agrícola evoluíram muito. Hoje o desenvolvimento das máquinas e implementos agrícolas transformou completamente o rumo da produção agrícola no mundo.

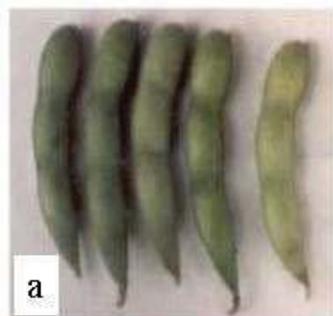
## 2.2 Vagem verde da soja e seus resíduos

O grão verde é uma cultura alimentar nutritiva, que ganha popularidade em toda a Ásia e nos Estados Unidos. É uma boa fonte de proteína e fibra e também tem altos teores de minerais e vitaminas. Além disso, também são conhecidas por benefícios potenciais para a saúde, incluindo efeitos preventivos sobre o câncer, doenças vasculares, osteoporose, sintomas da menopausa e função cognitiva (SCIARAPPA, 2005).

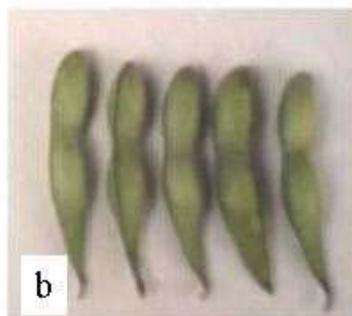
A vagem verde de soja, ilustrada na Figura 4, pode ser encontrada com dois a três grãos de soja no seu interior. São vagens de boa qualidade que podem ser reaproveitadas para alimento humano ou, após secagem e retilha, para o armazenamento junto ao grão normal (SIRISOMBOON et. al, 2006).

Figura 4 - Vagem verde com dois e três grãos

a) vagem com 3 grãos de soja



b) vagem com 2 grãos de soja

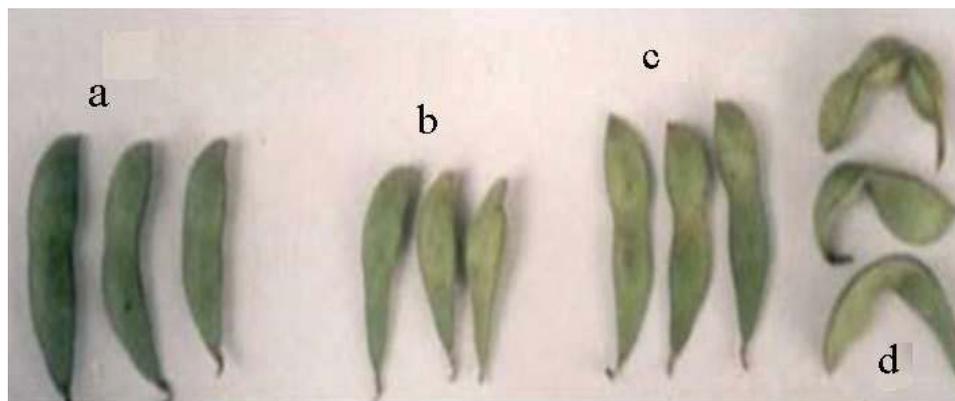


Fonte: SIRISOMBOON et. al, 2006.

A vagem verde ilustrada na Figura 5, também pode ser classificada em:

- a) Com grãos pequenos;
- b) Com um grão;
- c) Atrofiada;
- d) Distorcida ou defeituosa.

Figura 5- Classificação da vagem verde de soja



Fonte: SIRISOMBOON et. al, 2006.

### 2.3 Qualidade da vagem e dos grãos verdes

A coloração verde em produtos de soja é devida a presença de clorofila em grãos colhidos ainda imaturos. Fator esse que pode diminuir após algumas semanas de armazenamento na presença de aeração. Essa coloração verde é um problema, porque estará visível no óleo extraído e nos subprodutos, acarretando considerável aumento de custos nos processos de refino do óleo e produção de produtos proteicos (MANDARINO, 2012).

A presença da coloração verde nos grãos de soja surge, primeiramente, da prática comum de se acelerar o processo de colheita e reduzir perdas por debulha das vagens com a aplicação de dessecantes antes da colheita (FUKUSHIMA & LANFERMARQUEZ, 2000).

As condições de estresse por altas temperaturas, seca, insetos, percevejos e doenças também podem ocasionar a formação de grãos de soja pequenos e enrugados, descoloridos e imaturos de coloração esverdeada e conseqüentemente o aumento na quantidade de grãos e vagens verdes (EMBRAPA, 2014).

A taxa de descoloração dos grãos verdes dependerá do estágio de maturação, da temperatura de secagem e do grau inicial de umidade. A clorofila pode ser degradada por secagem com ar em temperatura ambiente de 25 °C, enquanto a secagem rápida com ar quente a 40 °C proporciona a retenção desse pigmento verde. Quando os grãos são secos pelo processo rápido, um alto conteúdo inicial de clorofila e significativo acúmulo de feofitinas são observados (FUKUSHIMA & LANFERMARQUEZ, 2000).

Segundo Mandarino (2012), os grãos imaturos de soja contêm de 2% a 3% menos óleo do que grãos maduros. O teor de ácidos graxos livres, também aumenta nos grãos imaturos (WIEBOLD, 2012).

## 2.4 Propriedades da vagem verde de soja e seus resíduos

Poucos estudos foram realizados sobre as propriedades da vagem verde de soja e seus resíduos que não foram trilhadas na colheita e recebidas pelas unidades armazenadoras de grãos, o que torna mais difícil o dimensionamento de um equipamento de secagem sem estes parâmetros fundamentais como por exemplo a densidade, umidade média na colheita, propriedades térmicas e suas características de secagem quando exposto ao ar quente.

### 2.4.1 Densidade, porosidade e umidade

A densidade pode ser definida como a razão entre a massa e o volume, muito importante na comercialização do produto e na definição do equipamento referenciando a massa do produto em relação ao seu volume ocupado.

A porosidade é a relação entre o volume ocupado pelo ar existente na massa de grãos. Tem grande influência sobre a pressão de um fluxo de ar que atravessa a massa do produto, refletindo-se no dimensionamento dos ventiladores dos sistemas de secagem.

A umidade é um fator fundamental no dimensionamento do secador. A diferença entre a umidade inicial e umidade final desejada, fornece a quantidade de água a ser retirada e, portanto, toda a energia necessária para esta remoção. São dados fundamentais que definem o dimensionamento do equipamento (CENTREINAR, 2008).

### 2.4.2 Calor específico, sensível e latente

Calor é a energia que flui devido a diferença de temperatura que, neste caso, ocorre entre o ar de secagem e a massa do produto. A unidade de uma Kcal serve para referenciar o calor necessário para variar um quilo de água em um grau Célsius. O calor específico é uma característica de cada material ou fluido. Quanto maior o calor específico, maior é a energia que o mesmo precisa para variar a temperatura (MORAN et al., 2005).

Calor sensível é aquele que adicionado ou removido de uma substância, provoca mudança de temperatura, sem causar mudança de fase, ou seja, apenas altera a temperatura de um corpo. O calor sensível está relacionado com o conceito de capacidade térmica, que corresponde à quantidade de calor que a massa total de um corpo precisa receber ou perder para que a sua temperatura altere em um grau centígrado (MORAN et al., 2005).

O calor latente é a quantidade de calor que, ao ser fornecida ou retirada de um corpo, não altera a sua temperatura, mas causa mudança em seu estado de agregação. Ele informa a quantidade de calor por unidade de massa que é necessário fornecer para mudar seu estado de agregação (MORAN et al., 2005).

A vaporização da água contida no produto é uma função da temperatura do ar de secagem e do teor de umidade do produto. Para que seja possível calcular o calor latente é necessário a definição de parâmetros específicos para cada tipo de produto (SILVA et al, 2000). A Tabela 1 ilustra alguns produtos com estes parâmetros definidos.

As equações (eq. 1 e 2) de Henderson e Chung-Pfost, são as que melhor expressam as variações contínuas de temperatura e umidade do ar em contato com o produto que ocasionam mudanças no teor de umidade de equilíbrio (CENTREINAR, 2008).

Vale ressaltar a importância destes dados para calcular a entalpia de vaporização da água nos produtos e processos de secagem. Os parâmetros A, B e C foram desenvolvidos de forma específica para cada produto (Tabela 1), com o objetivo de quantificar principalmente a umidade de equilíbrio ( $U_e$ ) e a entalpia de vaporização ( $h_v$ ) (CENTREINAR, 2008).

$$U_e = \frac{1}{B} \times \ln \left[ -\frac{(T+C)}{A} \times \ln(UR) \right] \quad (1)$$

$$h_v = (A - 0,57T) \times [1 + B \times \text{EXP}^{-C \times U}] \quad (2)$$

Tabela 1 – Parâmetros A, B e C para calcular o calor latente de vaporização

<b>Produto</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Milho</b>	606,000	4,350	28,250
<b>Arroz</b>	597,000	2,199	21,732
<b>Soja</b>	597,000	0,324	13,917
<b>Sorgo</b>	597,000	1,045	19,644
<b>Trigo duro</b>	597,000	1,307	17,609
<b>Feijão</b>	597,000	0,454	15,975

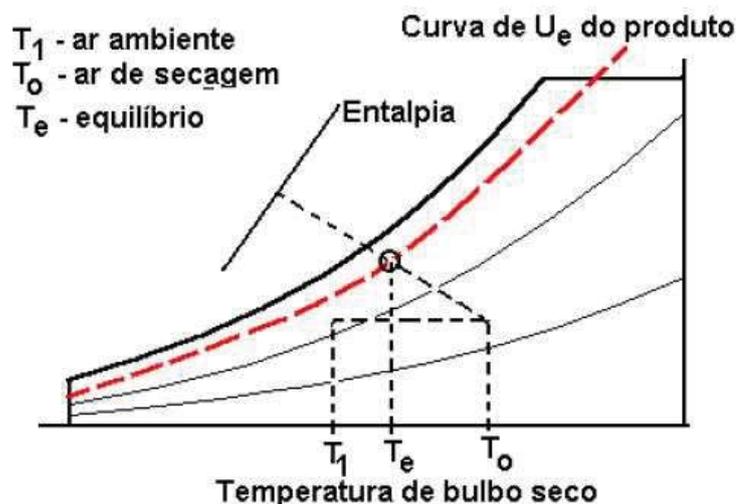
Fonte: Adaptado de SILVA et al, 2000.

### 2.4.3 Temperatura de equilíbrio

É a temperatura na qual o ar está em equilíbrio com o produto, ou seja, a umidade do grão está em equilíbrio com a umidade relativa e da temperatura do ar de secagem. Esta

temperatura pode ser calculada ou utilizar um gráfico psicrométrico para determinação da temperatura de equilíbrio (SILVA et al, 2000). Segue um exemplo, demonstrado na Figura 6, de uma curva de umidade de equilíbrio para o milho.

Figura 6 – Gráfico psicrométrico da temperatura de equilíbrio do milho



Fonte: SILVA et al, 2000.

A temperatura de equilíbrio ( $T_e$ ) pode ser determinada a partir da temperatura e da entalpia do ar de secagem ( $T_o$ ). Como a entalpia é constante pode-se traçar uma reta entre a temperatura de secagem e a entalpia até encontrar a curva de equilíbrio do produto ( $U_e$ ).

Para todos os produtos é necessário desenvolver experimentalmente a temperatura de equilíbrio e sua curva. Para o caso da vagem verde e seus resíduos, esta curva ainda não foi estudada, tendo que ser utilizado outros métodos para dimensionar as variáveis de secagem.

#### 2.4.4 Propriedades térmicas

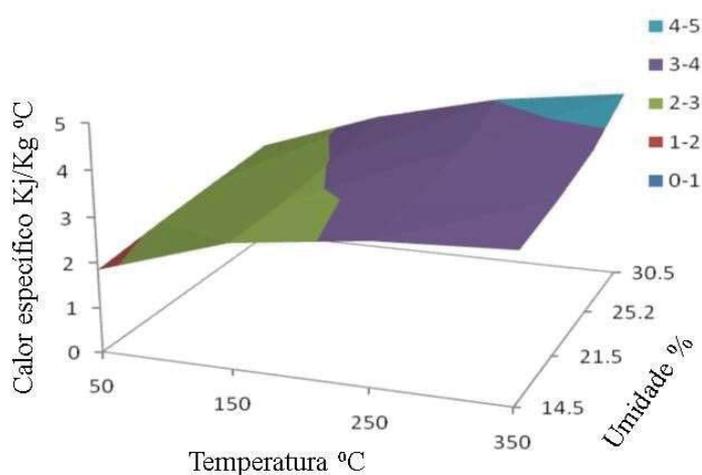
A condução de calor transitória durante a secagem, é um importante mecanismo para a transferência da umidade do produto para o ar de secagem. As propriedades térmicas são parâmetros importantes para o dimensionamento e são a base para analisar, otimizar e controlar a temperatura durante a secagem, armazenamento, transporte e comercialização (CENTREINAR, 2008).

É difícil controlar equipamentos de secagem, na falta de informações sobre o comportamento das propriedades térmicas. O tamanho do equipamento é geralmente

superestimado para compensar a falta de informação, levando a um design não ideal, com implicações de custo, bem como qualidade inferior do produto (AZADBAKHT, et al., 2013).

A condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico são úteis na secagem da soja e da vagem antes de debulhar e, assim reduzir as perdas durante a colheita. Ao aumentar o conteúdo de umidade de 14,5 para 30,5% e a temperatura de 50 para 350 °C, o calor específico aumentou de 1,856 para 4,39 KJ/kg °C (AZADBAKHT, et al., 2013), conforme ilustrado na Figura 7.

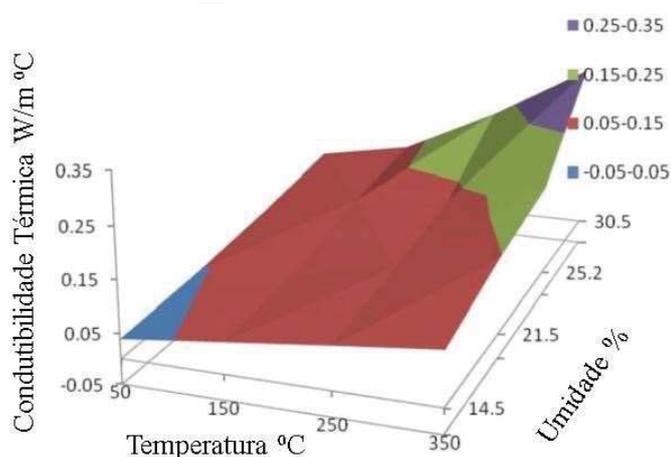
Figura 7 – Gráfico do calor específico da vagem verde de soja



Fonte: AZADBAKHT, et al., 2013.

A condutividade térmica, ilustrada na Figura 8, aumentou de 0,038 para 0,338 W/m °C com aumento da temperatura de 50 para 350 °C e umidade de 14,5 para 30,5%.

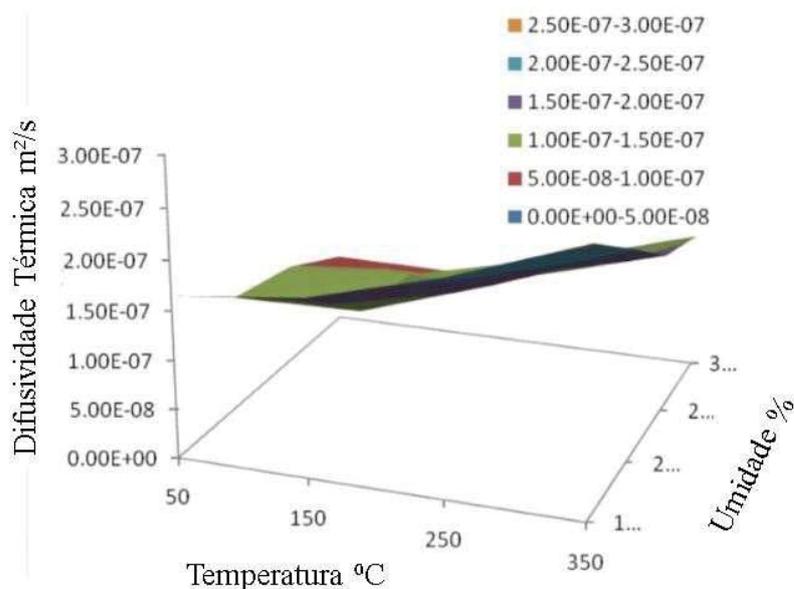
Figura 8 – Gráfico da condutividade térmica da vagem verde de soja



Fonte: AZADBAKHT, et al., 2013.

A difusividade térmica, conforme ilustrado na Figura 9, diminuiu de  $2,62 \times 10^{-7}$  para  $7,18 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  devido ao aumento de umidade de 14,5 a 30,5% e temperatura de 50 a 350 °C (AZADBAKHT, et al., 2013).

Figura 09 – Gráfico da difusividade térmica da vagem verde de soja



Fonte: AZADBAKHT, et al., 2013.

## 2.5 Viabilidade do aproveitamento

O Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 2014) analisou uma série de coletas de amostras de vagem verde em 24 caminhões entregues em 16 dias diferentes na Cooperativa Integrada Agroindustrial de Quarto Centenário - PR. Avaliou-se a porcentagem de vagens verdes no recebimento da carga, segregadas como amostras de forma manual e, na saída da máquina de pré limpeza conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Amostra da quantidade de vagem de soja

Amostra	Carga amostrada (kg)	Vagem verde na saída da pré limpeza (kg)	Vagens verdes na amostra manual (%)	Vagem verde na saída da pré limpeza %
1	7850	60	0,6	0,76
2	12720	570	3,9	4,48
3	38730	270	2,4	0,7
4	17180	270	2,2	1,57
5	5380	40	1,4	0,74
6	17170	150	1,5	0,87
7	17300	280	1,9	1,62
8	18930	180	1,2	0,95
9	13840	80	1	0,58
10	33870	100	1,1	0,3
11	16290	120	1	0,74
12	22160	150	1,2	0,68
13	12060	250	0,9	2,07
14	21730	120	0,4	0,55
15	16250	80	0,3	0,49
16	21270	60	0,6	0,28
17	13480	80	0,9	0,59
18	18380	520	1,8	2,83
19	15280	90	1,1	0,59
20	16700	340	1	2,04
21	10620	130	0,8	1,22
22	8630	40	0,3	0,46
23	18440	60	0,4	0,33
24	11310	320	1,5	2,83

Fonte: IAPAR, 2014.

Segundo Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR. 2014):

- A somatória das 24 amostras resultou num total de 405.570 kg de soja;
- A média de vagens verdes selecionadas foi de 1,08% resultando em 4.380 kg;
- Estas vagens foram debulhadas de forma manual com aproveitamento de 68,93%. Este processo gerou um resultado de aproveitamento de um grão de soja verde de aproximadamente 3,02 toneladas;
- Para o cálculo da massa final (mf) do aproveitamento dos grãos de soja, foi descontado o teor de umidade inicial (Ui) do grão que estava em torno de 40%, e após a secagem com 14% de umidade final (Uf) que é o padrão de comercialização. Para o cálculo da massa final usou-se a seguinte equação:

$$mf = \frac{mi \times (1 - U_i)}{1 - U_f} \quad (3)$$

Onde:

mi- massa inicial;

U<sub>i</sub>- umidade inicial e

U<sub>f</sub>- umidade final decimal.

- Que resultou em um aproveitamento normal do grão de 2,1 toneladas.

Fazendo um comparativo entre o total recebido de 405,57 toneladas e o total recuperado no processo de debulha e secagem de 2,1 toneladas, tem-se um ganho de 0,51%. O que é bem expressivo considerando uma perda média de 1,5% em resíduos de soja que podem ser reduzidos a 1% somente com a recuperação do grão de soja da vagem verde.

Aplicando-se o mesmo percentual na Cotripal Panambi, que armazenou 307.078 toneladas em 2016, temos um adicional de 1.566 toneladas de grão comercialmente recuperados (307.078 x 0,51%). Analisando de forma financeira tem-se 26.100 sacas que, para um valor de mercado aproximado de R\$ 65,00 a saca resulta num montante de R\$ 1.696.500,00.

O investimento em um sistema de secagem para vagem verde de soja e seus resíduos, pode ser amortizado em uma safra, além de poder ser aplicado para secagem de outros produtos. A unidade da Cotripal de Panambi-RS, processou em 2017 cerca de 28.859 toneladas de ração a base de soja para ração animal no qual este resíduo tem grande aplicação (COTRIPAL, 2017).

Outro experimento realizado na unidade armazenadora da COAMO, durante o recebimento da safra de verão 2014 ocorrida no período de 15 de janeiro a 05 de março de 2014, ilustrado na Tabela 3, demonstra um aumento significativo das vagens em relação ao recebimento da safra de 2010 (VECCHIO e LORINI, 2015).

Tabela 3 – Percentual de vagem recebida e retilhada

Descrição / Ano	2010	2011	2012	2013	2014
Quantidade Trilhada (kg)	186.250	251.360	366.460	328.080	353.820
Recebimento (sc)	1.166.836	1.181.248	900.899	1.171.268	1.136.085
% de Vagens x Recebimento	0,266	0,354	0,678	0,467	0,519

Fonte: Adaptado de VECCHIO e LORINI, 2015.

## 2.6 Introdução do processo de secagem

Os grãos são substâncias higroscópicas, que se caracterizam pela capacidade de ceder ou absorver umidade do ar. A higroscopia do grão determina a sua capacidade de troca de água

com o meio de ar que circula em torno de sua superfície. A intensidade e o sentido desta troca de umidade são determinados pelo potencial hídrico entre o grão e o ar. A transferência de umidade ocorre do maior para o menor potencial até que seja atingido o equilíbrio higroscópico entre o grão e o ar, ou seja, neste momento a transferência de água entre o grão e o ar é nula (WEBER, 2005).

A umidade de um grão pode se apresentar de três formas a saber:

- **Umidade superficial:** é a umidade localizada na parte externa do grão e que se encontra no estado líquido, é de fácil remoção através de evaporação;
- **Umidade intersticial:** é a umidade livre no interior do grão. Durante sua secagem é estabelecido um gradiente de pressão osmótica entre a parte interna e externa do grão, forçando o aumento da pressão interna para que ocorra a retirada da umidade do interior do grão de remoção relativamente fácil;
- **Umidade de constituição:** encontra-se quimicamente ligada aos componentes do grão (vitaminas, proteínas, carboidratos e gorduras). Não é removida durante a secagem.

Durante a secagem, a retirada de umidade do produto se dá pela transferência de água entre a superfície do produto e o ar que o envolve. A condição para que um produto seja submetido a secagem é de que a pressão de vapor sobre a superfície do produto seja maior do que a pressão do vapor de água no ar de secagem. Pode-se definir três condições distintas para avaliar a condição de secagem (SILVA et al, 2000):

- Quando a pressão de vapor na superfície do produto for maior do que a pressão do vapor de água de secagem ocorre a retirada de água no produto;
- Quando a pressão de vapor na superfície do produto for igual do que a pressão do vapor de água de secagem ocorre o equilíbrio higroscópico;
- Quando a pressão de vapor na superfície do produto for menor do que a pressão do vapor de água de secagem ocorre o umedecimento do produto.

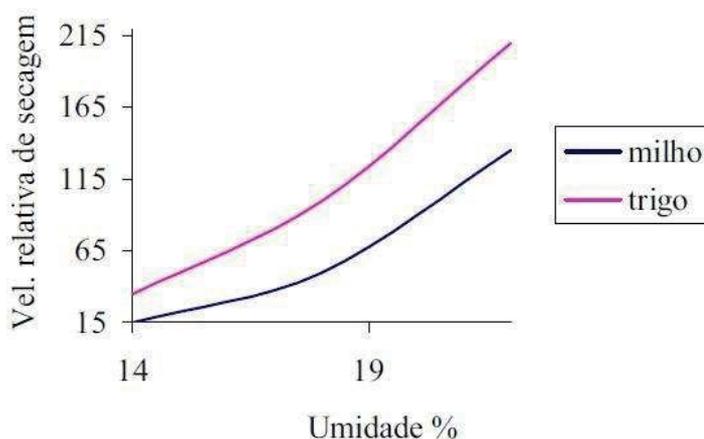
Quando não ocorre mais a transferência de massa (neste caso água), o grão atinge a umidade de equilíbrio. A pressão de vapor da água no interior do grão se iguala à pressão de vapor presente no ar, não havendo mais secagem (TRINDADE, 2013).

A umidade de equilíbrio varia de acordo com cada produto, e depende de fatores químicos e físicos dos mesmos. Os grãos ricos em óleos apresentam teores de umidade de equilíbrio mais baixos se comparados aos alimentos com alto índice de amido, mediante a exposição de igualdade de temperatura e umidade relativa (BIHAIN, 2011).

Na secagem se consegue retirar a umidade superficial e reduzir a umidade intersticial, permanecendo no produto a umidade de constituição, que representa cerca de 8 a 10% da umidade total (WEBER, 2005).

A velocidade de secagem depende do sistema utilizado e das características individuais de cada produto. De uma forma geral, grãos maiores tendem a demorar mais para secar do que grãos menores. Da mesma maneira, pode-se fazer comparações com o café. Se os grãos não forem separados por estado de maturação, tamanho e condição física semelhante, dificilmente terá um produto final que apresente secagem homogênea e o mesmo ponto de torra. Para efeito de comparação, a Figura 10 apresenta as velocidades de secagem de dois produtos diferentes submetidos a secagem (SILVA et al, 1999).

Figura 10 – Curva de secagem do milho e do trigo



Fonte: SILVA et al, 1999.

A operação de colheita leva em consideração o teor de umidade do grão, sendo que é indicada após a maturidade fisiológica do grão. Tal maturidade ocorre no momento em que os grãos atingem geralmente teores de umidade acima de 30%. Umidades incompatíveis com a tecnologia disponível para a colheita mecânica (CENTREINAR, 2008).

No processo de secagem para a obtenção de um grão de boa qualidade recomenda-se teores de umidade próximos de 16 a 20% de bulbo úmido (bu) e para a armazenagem próximos a 13% (WEBER, 2005). Conclui-se que para permitir a colheita antecipada com o objetivo de minimizar as perdas em campo a colheita deve ser antecipada e necessariamente precisa-se de um processo de secagem visando a preservação da qualidade fisiológica do produto.

O processo de secagem consiste na retirada de água do produto, por evaporação, até o nível que permita a sua armazenagem com uma boa conservação. Durante o processo de

secagem ocorre o transporte de água, nas formas de líquido e vapor, do interior para a superfície do produto e desta para o ar por convecção. Este transporte pode ocorrer nas formas líquido e vapor, do interior para a superfície do grão. Os principais mecanismos de transporte de água, durante este processo de secagem são (PARK et al. 2007):

- **Difusão líquida:** é o transporte líquido devido a existência de gradientes de concentração de umidade, ou seja, transporte molecular;
- **Difusão de vapor:** é o transporte de vapor devido ao gradiente de pressão de vapor provocado pelo gradiente de temperatura necessária para vaporizar a água contida no produto;
- **Transporte de líquido vapor:** ocorre devido a diferença de pressão total e capilaridade.

## 2.7 Sistemas de secagem

A classificação dos sistemas de secagem, pode ser estudada conforme ilustrado no quadro 1 (SILVA et al. 1999):

Quadro 1 – Classificação dos sistemas de Secagem

Sistemas de secagem	Natural – no campo, na própria planta				
	Artificial	Ventilação Natural	Terreiros e paióis		
			Secagem Solar		
			Outros		
		Ventilação Forçada	Altas Temperaturas	Ar Natural	Camada fixa
					Cruzados
				Quanto aos fluxos	Concorrentes
					Contra-correntes
					Cascata
					Rotativo
					Fluidizado
					Solar híbrido
				Quanto à operação	Intermitentes
Contínuos					
Baixas Temperaturas					
Sistemas Combinados					
Seca-aeração					
Convecção					

Fonte: SILVA et al. 1999.

### 2.7.1 Secagem Natural

A secagem natural emprega o ar natural que se encontra no meio ambiente, na própria planta sem a interferência do homem para remover a umidade. Os produtos são dispostos em eiras ou lonas, tendo-se o cuidado para que os grãos possam ser secos uniformemente. Este

método é pouco afetado por danos mecânicos e térmicos, no entanto, dependente das condições psicrométricas do ar ambiente, que muitas vezes não são adequadas para a secagem. É um método adequado para reduzida quantidade de grãos (SILVA et al, 1999).

### 2.7.2 Secagem Artificial

A secagem artificial é caracterizada pela utilização de processos manuais ou mecânicos tanto no manejo do produto quanto na passagem do ar através da massa de grãos. No caso do terreiro e do paiol, a secagem ocorre pela ventilação natural (ação dos ventos), mas na maioria dos casos o ar é forçado por meio de ventiladores (SILVA et al, 1999).

Na secagem com ventilação forçada, pode-se empregar baixa temperatura, alta temperatura, secagem combinada e outros. Secagem em baixas temperaturas é um método artificial de secagem em que se utiliza ar natural ou ar levemente aquecido (até 10 °C acima da temperatura ambiente). A secagem com alta temperatura é aquela em que o ar de secagem é aquecido a uma temperatura superior a 10 °C acima da temperatura ambiente (SILVA, et al., 2000).

#### **- Ventilação natural**

Difere da secagem natural, simplesmente pelo fato do produto ser retirado da planta e espalhado em camadas geralmente inferiores a 5 centímetros, em uma área previamente preparada. A energia utilizada para remoção da umidade é proveniente da radiação solar e da entalpia do ar (SILVA et al, 1999).

#### **- Ventilação forçada com ar natural**

Normalmente aplicada em silos e armazéns utilizando apenas ar natural ou com baixa temperatura, insuflado na massa de grãos. É um processo lento e utilizado para manutenção da umidade e temperatura desejada ao produto (SILVA et al, 1999).

#### **- Ventilação forçada com altas temperaturas**

A secagem artificial a altas temperaturas é baseada em um fluxo forçado aquecido. Este método permite o controle dos parâmetros necessários para manter a qualidade do produto e

obter a umidade e temperatura de armazenagem correta. Também é o mais utilizado pelo fato deste método não depender das condições climáticas do ambiente e permitir a secagem com rapidez, na escala planejada através do eficiente controle de temperatura, vazão de ar de secagem e o tempo de exposição (SILVA et al, 1999).

## 2.8 Classificação dos secadores

De uma forma geral, as unidades armazenadoras possuem vários equipamentos desenvolvidos para o recebimento, transporte, limpeza, secagem e armazenagem de produtos agrícolas, além de sistemas de aeração, termometria, balanças e expedição. Os secadores podem ser classificados quanto as suas características e ao fluxo do produto e do ar.

### 2.8.1. Quanto as suas características

Os secadores são classificados de diversas maneiras conforme suas características particulares (WEBER, 2005):

- **Tipo de fabricação:** Podem ser móveis e fixos. Os móveis são de menor porte para permitir sua movimentação. Os fixos permanecem instalados em um determinado local e são os mais utilizados;
- **Sistema de carga/funcionamento:** Classificados em intermitentes, onde o produto passa mais de uma vez para ser secado, ou seja, ocorre a recirculação do produto e contínuos, para os produtos que passam pelo sistema de secagem uma única vez para atingir o teor de umidade desejado;
- **Forma de movimentação do ar:** O ar de secagem pode ser insuflado antes da massa do produto a ser secado ou aspirado após sua passagem pelo produto;
- **Sentido do fluxo do ar de secagem:** Pode ser concorrente, contracorrente, cruzado e misto. Concorrente quando o fluxo do ar de secagem possui o mesmo sentido do fluxo do produto a ser secado. Contracorrente opera de forma contrária ao ar de secagem no sentido oposto ao fluxo do produto. Misto quando o fluxo de ar de secagem ocorre nos dois sentidos concorrente e contracorrente e o fluxo de secagem cruzado se dá no sentido ortogonal ao fluxo do produto;
- **Quanto a torre de secagem:** por calhas paralelas ou cavaletes, calhas cruzadas, de colunas e com câmara de descanso;

- **Sistemas de descarga:** Pode ser por bandejas mecânicas, descarga pneumática ou eclusas rotativas;
- **Quanto as fontes de calor:** Combustíveis sólido, líquido ou gasoso, sendo o mais utilizado a lenha, casca de arroz, briquetes;
- **Quanto ao ar de secagem da fornalha:** Ar direto ou fogo direto é quando o ar de combustão entra diretamente em contato com o produto, ou indireto quando tem se um trocador de calor intermediário, para este sistema os gases de combustão não entrem em contato com o produto tendo a vantagem de não contaminar o produto com a fumaça e reduz fortemente a possibilidade de incêndio no secador;
- **Quanto ao sistema de controle:** Manual ou automatizada. Os parâmetros da temperatura do ar de entrada, temperatura e umidade do ar de saída, velocidade/volume de passagem do produto bem controlados reduz o consumo de lenha, mantém a secagem mais homogênea, reduz o consumo de energia, reduz o risco de incêndio ocorre a retirada de água no produto.

#### 2.8.2. Quanto ao fluxo do produto e do ar

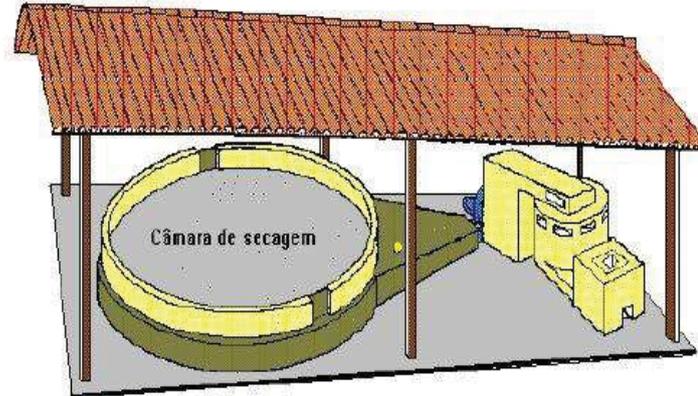
Tomando-se como referência o fluxo de produto e fluxo de ar nos sistemas de secagem a alta temperatura, pode-se classificar os secadores em:

- Camada fixa horizontal;
- Fluxos cruzados;
- Fluxos contracorrentes;
- Fluxos concorrentes;
- Cascata ou de fluxos mistos;
- Rotativo; e
- Leito fluidizado.

#### - Secador de camada fixa horizontal

A camada de grão a ser secada permanece estática sobre um fundo perfurado onde passa o ar de secagem pela massa do produto. O sistema dispõe de fornalha, ventilador e câmara de secagem. É aplicado normalmente a pequenas propriedades, conforme ilustrado na Figura 11 (SILVA et al. 1999).

Figura 11 – Secador de camada fixa horizontal

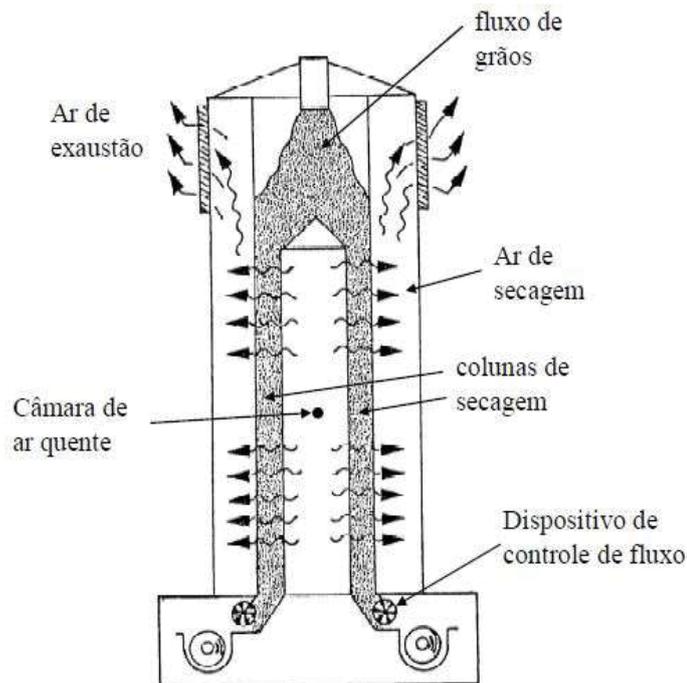


Fonte: Silva et al, 1999.

### - Secador de fluxos cruzados

O produto e o fluxo de ar de secagem se cruzam sob um ângulo de  $90^\circ$  na câmara de secagem. Conforme é ilustrado na Figura 12, ocorre inversão de lado das colunas de grãos da primeira para segunda câmara de secagem. Isto é feito para homogeneizar o teor de umidade na massa de grãos, pois o produto que se encontra mais próximo à entrada do ar de secagem, torna-se mais seco e aquecido (SILVA et al., 2000).

Figura 12 – Secador de fluxos cruzados

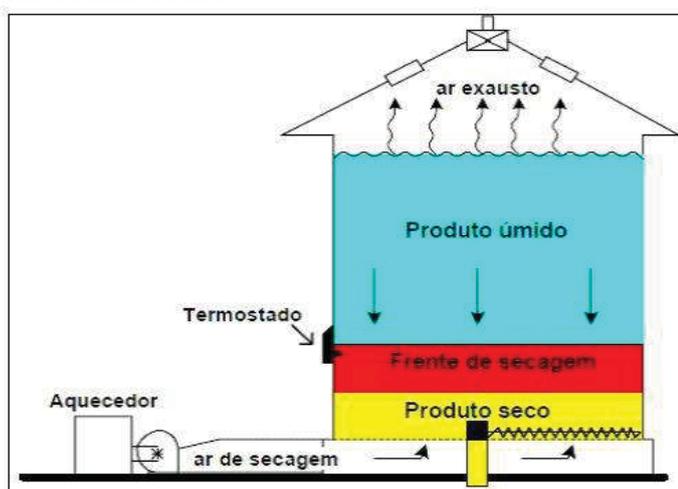


Fonte: WEBER, 2005.

### - Secador de fluxos contracorrentes

O fluxo do produto e ar de secagem ocorrem em sentidos opostos conforme ilustra a Figura 13, sendo que o fluxo de grãos se dá no sentido contrário ao fluxo de ar. Em seu funcionamento, a frente de secagem permanece sempre junto ao fundo e a entrada de ar, a medida que ocorre a secagem o produto pode ser retirado. Este sistema pode ser aplicado tanto em secadores como em silos. Para evitar danos ao produto a temperatura de secagem não deve ultrapassar a 70 °C (SILVA et al., 2000).

Figura 13 – Secador de fluxos contracorrentes



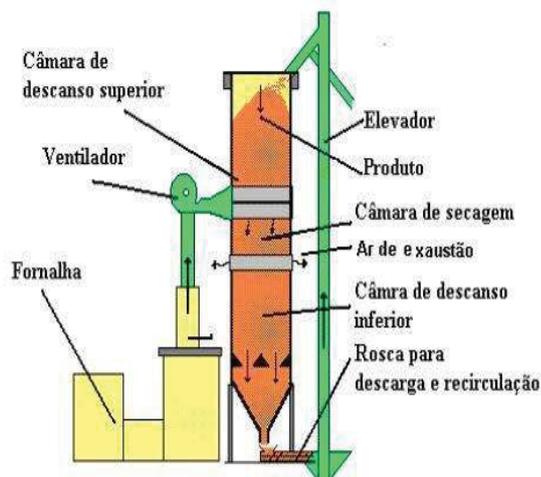
Fonte: SILVA, 2000.

### - Secador de Fluxos Concorrentes

O fluxo do produto e do ar de secagem fluem no mesmo sentido dentro do secador conforme ilustrado na Figura 14. Altas taxas de evaporação ocorrem na parte superior da camada onde o ar se encontra mais quente e seco em contato com o produto mais úmido (SILVA et al., 2000).

Esta troca de energia e massa na entrada de ar do secador causam rápida redução da temperatura inicial do ar de secagem, assim como no teor de umidade do produto. Estes secadores são caracterizados pela alta eficiência energética e pela boa qualidade final do produto (SILVA et al., 2000).

Figura 14 – Secador de fluxos concorrentes



Fonte: SILVA et al, 2000.

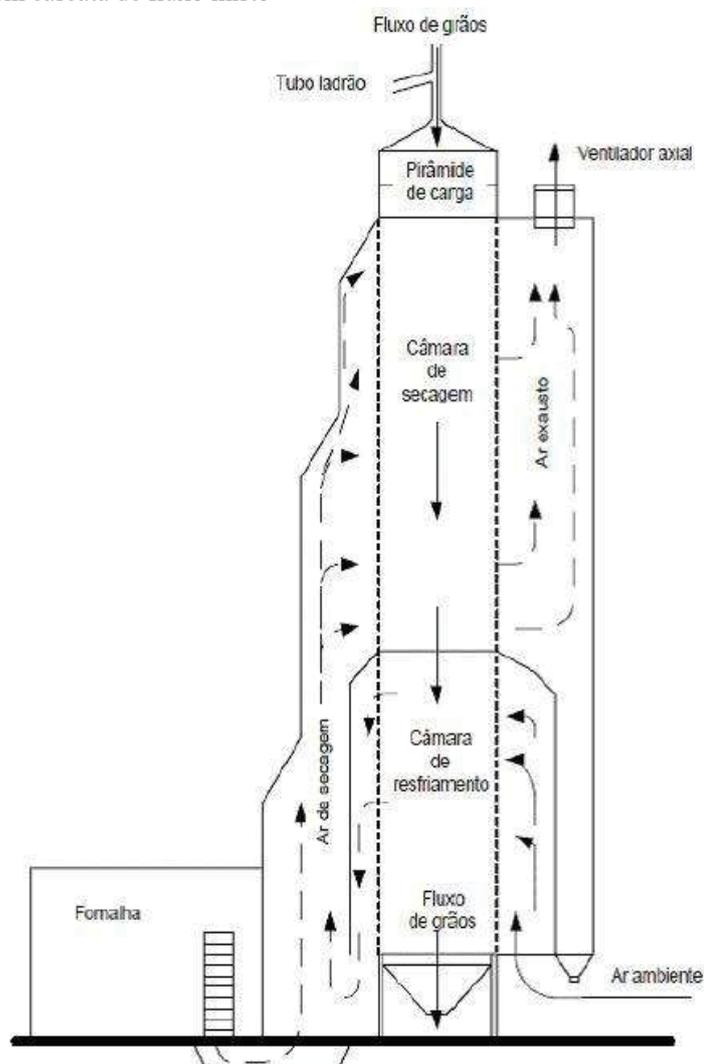
#### - Secador em cascata ou de fluxos mistos

É confeccionado por uma série de calhas invertidas em formato “V”, dispostas em linhas alternadas, formado uma torre de secagem. O produto se movimenta entre as calhas pela ação da gravidade. É o modelo de secador mais utilizado pelas unidades armazenadoras, disponibilizado com capacidades de secagem de 15 a 250 toneladas por hora (SILVA et al, 2000).

Conforme ilustrado na Figura 15, dois terços da altura superior da torre correspondem à câmara de secagem e um terço da parte inferior da altura da torre é destinado à câmara de resfriamento, cujo objetivo é retirar calor da massa de grãos, deixando-a com temperatura próxima a ideal para a armazenagem.

Pelo lado esquerdo entra o ar de secagem com temperaturas entre 60 a 100 °C, e do lado direito é procedida a sucção do ar saturado, que geralmente possui temperatura em torno de  $\pm 7$  °C acima da temperatura ambiente. Este modelo de secador tem ventiladores colocados na parte superior, podendo também dispor na lateral ou junto à base. A função dos ventiladores é garantir a vazão de ar necessária à secagem. Sobre a torre do secador está montada a pirâmide de carga ou funil de carga sendo que neste local deve ser mantida uma quantidade de grãos que permita a torre sempre estar cheia. Isto evita a passagem direta do ar de secagem de um lado da torre para o outro o que representa uma economia de energia calorífica (SILVA et al., 2000).

Figura 15 – Secador em cascata de fluxo misto



Fonte: SILVA et al., 2000.

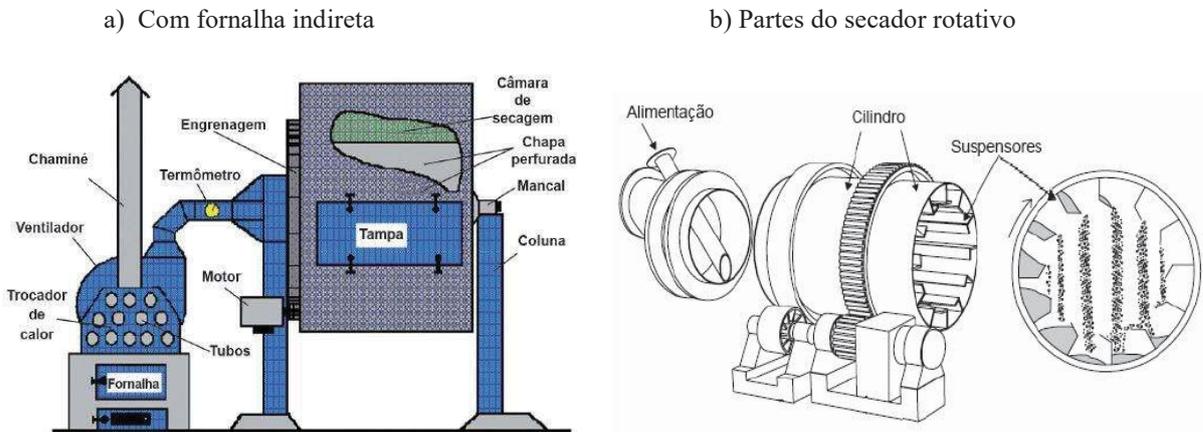
### - Secador rotativo

Formado por um cilindro tubular horizontal, ou com pequena inclinação para facilitar o deslocamento do produto, gira em torno do eixo horizontal entre 1 a 15 rotações por minuto. No caso de secador contínuo, o produto úmido é abastecido na parte mais alta do tambor e o produto se desloca por gravidade ou através de hélices internas ao tambor. O ar de secagem introduzido no tambor pode ser no mesmo sentido do produto ou sentido contrário.

A parte interna do secador é feita com suspensores para que ocorra maior eficiência na transferência de massa e calor entre os gases e o material a ser secado. As dimensões típicas e distribuições dos suspensores deverão ser determinadas pelas propriedades do material a ser secado, podendo inclusive variar ao longo da câmara cilíndrica (PERRY, 1999). A Figura 16a

ilustra o secador rotativo com fornalha indireta e a 16b uma sugestão de suspensores, sistema de alimentação e acionamento para rotação do tambor.

Figura 16 – Secador rotativo



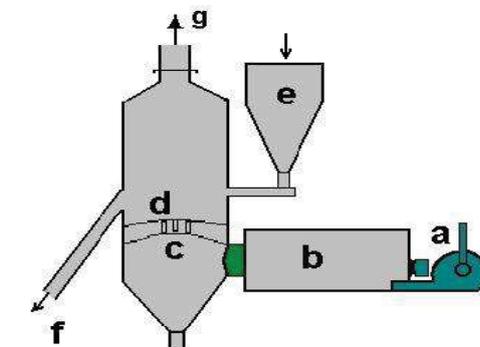
Fonte: SILVA, 2000.

Fonte: SILVA et al. 2012.

### - Secador de leito fluidizado

O ar de secagem atravessa uma placa perfurada provocando turbulência no produto que se encontra sobre esta placa. A intensidade do fluxo de ar deve ser tal que supere a velocidade terminal do produto, provocando turbulência. Devido a baixa capacidade de secagem e elevada potência exigida pelo ventilador não é comumente utilizado conforme demonstrado na Figura 17 (SILVA et al., 2000).

Figura 17 – Secador de leito fluidizado



**a - Ventilador; b - aquecedor;**  
**c - placa perfurada; d - leito**  
**fluidizado;**  
**e - carga;**  
**f - saída do produto; e**  
**g - saída de ar.**

Fonte: SILVA, 2000.

## 2.9 Propriedades do ar natural e do ar de secagem

As propriedades termodinâmicas da mistura de ar seco aquecido e vapor de água são fundamentais para o dimensionamento de um sistema de secagem, devido às trocas de umidade que ocorrem entre o produto e o ar que o circunda (MELO et, al. 2004).

O volume do ar é constituído de uma mistura de gases (basicamente nitrogênio, oxigênio), vapor de água e uma série de contaminantes, como partículas sólidas e outros gases. O ar seco existe quando se remove todo o vapor de água e seus contaminantes e sua composição é relativamente constante, apesar de pequenas variações em função da altitude em que se encontra (MELO et, al. 2004).

A temperatura e umidade relativa do ar, além da pressão atmosférica, são parâmetros normalmente conhecidos no local da instalação dos equipamentos. Quando este ar é aquecido, são estabelecidas propriedades termodinâmicas (psicrométricas) para quantificar a mistura da secagem a alta temperatura. Para estas condições associadas é necessário saber:

- Pressão atmosférica (P): pressão exercida pela atmosfera sobre a superfície terrestre, varia com a altitude e sua referência é a nível do mar;
- Pressão de vapor (pv): pressão parcial exercida pelo vapor de água não saturado;
- Pressão de saturação (pvs): pressão do vapor quando o ar está saturado;
- Umidade relativa (UR): definida como a razão percentual entre a pressão de vapor de água no ar e a pressão de vapor de água quando o ar se encontra saturado;
- Temperatura de bulbo seco (T): temperatura do ar úmido, ou simplesmente a temperatura do ambiente por termômetros comuns que correspondem ao calor sensível do ar úmido (°C);
- Temperatura de bulbo úmido (tu): para obtê-la é necessário cobrir um termômetro de bulbo seco com um tecido de algodão umedecido. O bulbo molhado deve ser ventilado a uma velocidade de 2,5 a 5,1 m/s, provocando a evaporação da umidade do tecido resfriando o bulbo. Quanto menor for a quantidade de vapor de água presente no ar, mais água será removida e maior será a redução da temperatura do bulbo molhado em relação ao bulbo seco. Quando estas temperaturas se igualam a UR assume o valor igual a 100%, ou seja, está saturado;
- Densidade absoluta do ar seco (das): é a massa de ar seco contido num determinado volume de ar (kg de ar seco/m<sup>3</sup> de ar);
- Razão de mistura do ar (Rm): é a massa de vapor de água contida por unidade de massa de ar seco (gramas de vapor/kg de ar seco).

A quantidade de vapor de água presente na mistura do ar pode variar de zero até um valor que corresponde a condição de saturação, ou seja, o ar está com sua capacidade máxima de vapor de água que pode suportar dentro de uma determinada pressão e temperatura.

## **2.10 Dimensionamento dos parâmetros de secagem**

A maioria dos produtos agrícolas são colhidos com teores de umidade superiores aos recomendados para uma armazenagem segura. A secagem é um processo que visa remover o excesso de umidade que envolve transferência de calor e massa entre o produto a ser secado e o ar usado na secagem (CENTREINAR, 2008).

A simulação matemática de secagem em produtos agrícolas teve seu auge nas décadas de 1960 e 1970, com destaque para os modelos de Thompson e Michigan. Entretanto, nenhum abordou a condição de entalpia constante do ar de secagem. Estudos conduzidos na Universidade Estadual de Maringá permitiram concluir que os balanços de energia e de massa de um processo de secagem estão incluídos no uso da mesma entalpia durante o processo de secagem (DALPASQUALE et al, 2009).

Com a nova razão de mistura a partir da entalpia constante, avalia-se a nova temperatura do ar de secagem na saída da camada do produto e, com estas duas propriedades psicrométricas, a umidade relativa do ar de secagem. Se ela atingir a condição desejada ou saturada, encerra-se o dimensionamento de secagem naquele parâmetro (DALPASQUALE e SPERANDIO, 2007). Para o dimensionamento dos parâmetros de secagem, faz-se necessário o uso das equações 3 a 23 conforme descrito abaixo.

### **2.10.1 Teor de umidade do produto**

Geralmente os secadores são dimensionados de acordo a capacidade necessária para atender a demanda do produtor e sua umidade inicial e final desejada.

A massa úmida inicial em excesso, colhida em campo, deve ser retirada pelo secador para armazenar o produto numa umidade que mantenha a qualidade deste produto durante seu período de armazenagem. A massa de saída, após secagem e umidade final, depende da quantidade de água retirada pelo secador. Tendo então a massa inicial ( $m_i$ ), umidade inicial ( $U_i$ ) e umidade final ( $U_f$ ) desejada ou efetivamente secada, podemos definir a massa final ( $m_f$ ) a ser armazenada conforme equação 3 (CENTREINAR, 2008).

$$mf = \frac{mi \times (1 - U_i)}{1 - U_f} \quad (3)$$

A massa de água removida durante o processo de secagem é dimensionada com base na quantidade de massa inicial a secar por hora e, nos teores de umidade inicial e final do produto. A diferença entre a massa inicial e a massa final nos fornece a quantidade de água retirada durante a secagem conforme demonstrado na equação 4.

$$mar = mi - mf \quad (4)$$

Onde:

mf – massa final (após a secagem);

mi - massa inicial do produto em kg;

U<sub>i</sub> - teor de umidade inicial em base úmida (decimal);

U<sub>f</sub> - teor de umidade final em base úmida (decimal);

mar - massa de água removida do produto em kg.

### 2.10.2 Propriedades do ar de entrada

A partir da condição da pressão atmosférica (P), temperatura (T) e umidade relativa (UR) do local da instalação do secador, aplica-se uma série de equações das leis da termodinâmica, para identificar a quantidade de massa de vapor de água presente no ar natural:

a) Pressão de vapor saturado (p<sub>vs</sub>);

$$p_{vs} = 6,1078 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T}{237,3 + T}\right)} \quad (5)$$

b) Pressão de vapor não saturado (p<sub>v</sub>);

$$p_v = p_{vs} \times UR \quad (6)$$

$$p_v = \frac{R_m \times P}{0,622 + R_m} \quad (7)$$

c) Densidade absoluta do vapor de água (d<sub>va</sub>) ou umidade absoluta do ar (kg de vapor de água/m<sup>3</sup> de ar);

$$d_{va} = \frac{0,21668 \times p_v}{T} \quad (8)$$

d) Razão de mistura (gramas de vapor/ kg de ar);

$$R_m = \frac{0,622 \times p_v}{P - p_v} \quad (9)$$

e) Densidade absoluta do ar seco: (kg de ar seco/m<sup>3</sup> de ar);

$$d_{as} = \frac{0,34837 \times (P - p_v)}{T + 273,15} \quad (10)$$

f) Volume específico do ar seco (m<sup>3</sup> de ar/ kg de ar seco);

$$V_e = \frac{1}{d_{as}} \quad (11)$$

g) Massa de ar seco (mas) na entrada (kg de ar seco/hora) conforme a vazão de ar de secagem (Qes) na entrada do secador que provem tanto da fornalha como do ar de mistura do secador (m<sup>3</sup>/hora);

$$m_{as} = d_{as} \times Q_{es} \quad (12)$$

h) Massa do vapor de água (mva) na entrada (kg de vapor de água/hora) conforme a vazão de ar (Qes) na entrada do secador que provem tanto da fornalha como do ar de mistura do secador (m<sup>3</sup>/hora).

$$m_{va} = m_{as} \times R_m \quad (13)$$

### 2.10.3 Propriedades do ar de secagem

Na operação de secagem, muitas vezes, o ar deve ser aquecido para que ele tenha seu potencial de absorção de água aumentado, acelerando o processo de secagem. Assim que o ar é aquecido sua temperatura (T) e entalpia (h) aumentam e, ao atravessar a camada do produto a ser secado, a umidade relativa e a razão de mistura aumentam, a temperatura de bulbo úmido diminui e a entalpia permanece constante.

As condições iniciais da temperatura de secagem e a razão de mistura do ar natural (Rm) são necessárias para calcular a entalpia do ar de secagem, que será mantida constante durante todo o processo (DALPASQUALE e SPERANDIO, 2007).

$$h = (1.006,76 \times T) + [R_m(2.502.086,97 + (1.862,79 \times T))] \quad (14)$$

Para esta etapa é necessário fazer uma iteração, com as quatro equações apresentadas a seguir, mantendo a entalpia constante e variando a temperatura, até atingir a umidade relativa

do ar de saída próxima ou superior a 80%. Indicando uma eficiência razoável nos parâmetros de secagem.

$$Rms = \left[ \frac{h - (1.006,76 \times Ts)}{(2.502.086,97 + (1.862,79 \times Ts))} \right] \times UR \quad (15)$$

Pressão parcial do vapor na saída conforme nova razão de mistura após passagem do ar de secagem pela massa do produto.

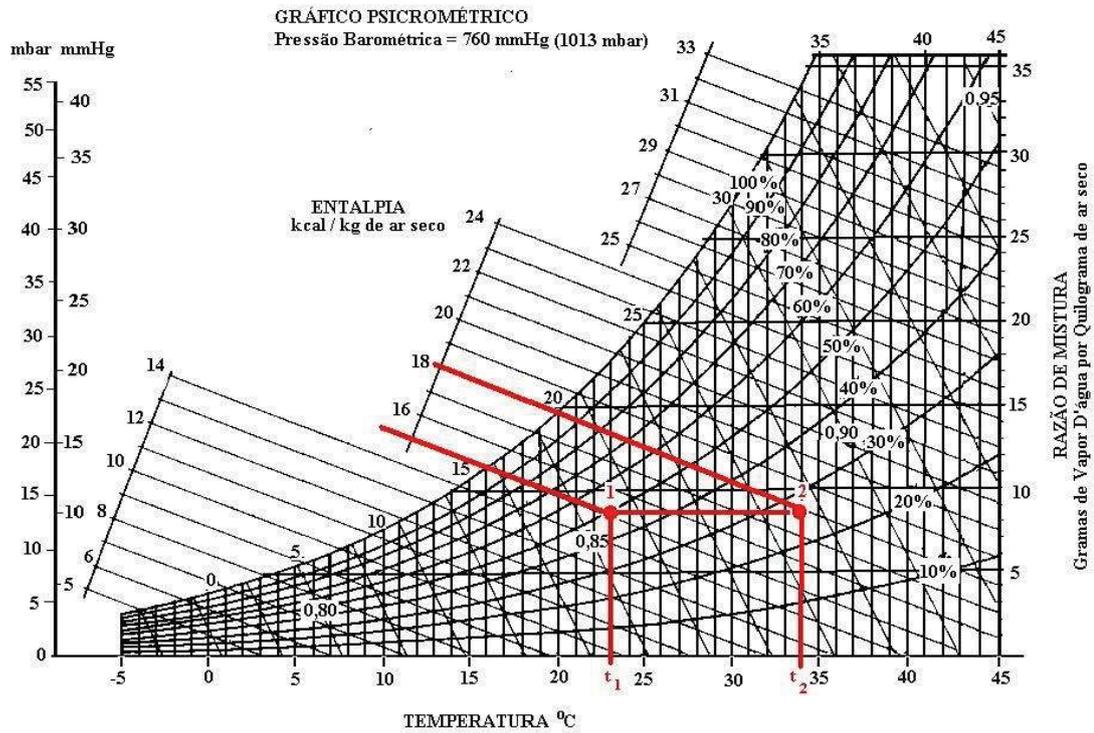
$$pv = \frac{Rms \times Ts}{0,622 + Rms} \quad (16)$$

$$pvs = (6,1078 \times 10^{(7,5+T)/(237,3+T)}) \times UR \quad (17)$$

$$UR = \frac{pv}{pvs} \quad (18)$$

O processo de secagem em camada profunda também pode ser representado em um gráfico psicrométrico, conforme ilustrada na Figura 18. O ar se move através do aquecedor (ponto de estado de 23 °C para ponto de estado 34 °C), sua temperatura e entalpia aumentam de 14 para 18 Kcal/kg de ar seco e, ao atravessar a camada de produto (ponto de estado 2 para ponto de estado 3), a umidade relativa e a razão de mistura aumentam, a temperatura de bulbo úmido diminui e a entalpia permanece constante.

Figura 18 – Gráfico psicrométrico



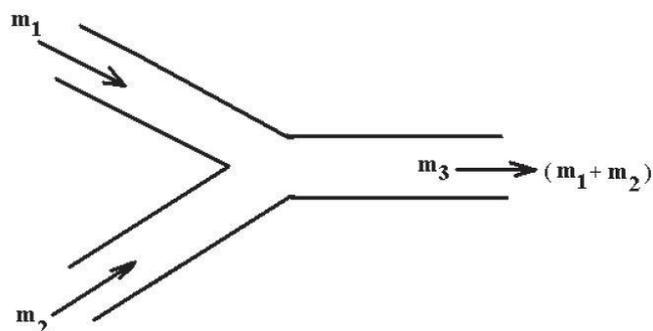
Fonte SILVA et al., 2000.

### - Mistura de dois fluxos do ar de secagem

Na grande maioria dos secadores agrícolas, são misturadas duas massas de ar com diferentes fluxos e propriedades termodinâmica conforme ilustrado na Figura 19. As condições finais da mistura resultante podem ser determinadas por meio de gráficos psicrométricos. Considerando dois fluxos de massa  $m_1$  e  $m_2$ , temperatura  $T_1$  e  $T_2$ , razões de misturas  $R_{m1}$  e  $R_{m2}$  e entalpias  $h_1$  e  $h_2$ , a mistura final terá fluxo de massa  $m_3$ , temperatura  $T_3$ , razão de mistura  $R_{m3}$  e entalpia  $h_3$  (SILVA et al.2000). Os balanços de energia e de massa para esse processo são:

$$m_1 + m_2 = m_3 \quad (19)$$

Figura 19 – Mistura de duas massas de ar



Fonte: SILVA et al., 2000.

$$(m_1 \times R_{m1}) + (m_2 \times R_{m2}) = m_3 \times R_{m3} \quad (20)$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} \quad (21)$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{R_{m2} - R_{m3}}{R_{m3} - R_{m1}} \quad (22)$$

#### 2.10.4 Quantidade de água removida na secagem

Com a nova razão de mistura na saída do secador ( $R_{ms}$ ) após a passagem do ar de secagem pela massa de grão, pode ser definida a quantidade da massa do vapor de água retirada ( $m_{var}$ ) por um determinado período, uma hora por exemplo. Fazendo o quociente da massa de água a ser retirado do produto para que se atinja o percentual de umidade desejado, pela massa de vapor de água retirada pelos parâmetros de secagem é obtido o tempo de secagem (DALPASQUALE e SPERANDIO, 2007).

$$m_{var} = m_{vas} - m_{vae} \quad (23)$$

$$t_{sec} = \frac{m_{ar}}{m_{var}} \quad (24)$$

Onde:

- $m_{var}$  – massa do vapor de água removida na secagem;
- $m_{ar}$  – massa de água retirada (conforme umidade final desejada);
- $m_{vas}$  – massa do vapor de água na saída;
- $m_{vae}$  – massa do vapor de água na entrada;
- $t_{sec}$  – tempo de secagem.

## 2.11 Dimensionamento da secagem pelo método de Milman

De acordo com MILMAN (2002) a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura dos grãos e da água que o impregna, até a temperatura de secagem pode ser calculado conforme a equação 25:

$$Q_c = m_i \times [((1 - U_i) \times C_{ep}) + (U_i \times C_{ea})] \times (T_s - T_{ip}) + (m_{ar} \times C_{la}) \quad (25)$$

Sendo que:

$Q_c$  = quantidade de calor necessário à secagem em kcal;

$m_i$  = massa inicial do produto a ser secado em kg;

$U_i$  = teor de umidade inicial % BU;

$U_f$  = teor de umidade final % BU;

$C_{ep}$  = calor específico do produto a ser secado (kcal/kg °C);

$C_{ea}$  = calor específico da água (1 kcal/kg °C);

$C_{la}$  = calor latente de vaporização d'água (540 kcal/kg);

$T_s$  = temperatura de secagem;

$T_{ip}$  = temperatura inicial do produto.

Considerando uma perda ( $p$ ) estimada em 30% tem-se que a quantidade de calor necessária final ( $Q_{cf}$ ) para a retirada de umidade dos grãos é de (MILMAN, 2002):

$$Q_{cf} = Q_c \times p \quad (26)$$

A vazão de ar necessária ( $Q_{as}$ ) para a secagem da massa de produto é dada pela equação 27 (MILMAN, 2002).

$$Q_{as} = \frac{Q_{cf}}{0,286 \times (T_s - T)} \quad (27)$$

## 2.12 Tempo de residência do produto durante a secagem

O tempo de secagem depende da capacidade de evaporação da instalação e do tipo de umidade inicial do produto. Deve-se ter em mente que a evaporação de água em relação ao tempo de secagem não é linear, sendo rápida quando o teor de umidade é elevado e mais lenta quando se aproxima da umidade de armazenagem (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001).

O manejo adequado da velocidade do produto é de fundamental importância na secagem, principalmente em processos de secagem contínuo, onde em uma passada, deve-se garantir uma secagem homogênea e na umidade adequada a uma armazenagem segura e de boa qualidade. (CENTREINAR, 2008).

A taxa de secagem varia com as propriedades físicas do produto e o seu teor de umidade. Quanto maior for o teor de umidade inicial maior será a quantidade de água evaporada por unidade de energia. Com altos teores de umidade, as forças de absorção da estrutura celular do material sobre as moléculas de água são menores do que num teor de umidade mais baixo (CENTREINAR, 2008).

A velocidade que o material passa no secador, na maioria das vezes denominada de massa ou tempo de residência do produto por um determinado período, pode influenciar na taxa de secagem, na eficiência do processo e na qualidade final do produto. Se for aumentada a velocidade do fluxo de massa haverá um aumento de energia requerida para evaporar a unidade de massa de água necessária, o que pode alterar a eficiência térmica da secagem. Os grãos que passam no secador com maior velocidade perdem menos umidade e a secagem pode não ser suficiente.

Iguaz et al. (2003) apresentou uma modelagem matemática de um secador rotativo baseado no método dos elementos de volume, onde para cada um destes elementos foram efetuados balanços de massa e de energia. As equações 28 e 29 foram utilizadas por Iguaz et al. (2003) para o cálculo do tempo de residência de um produto exposto a secagem num tambor rotativo.

$$B=5 \times D_p^{-0,5} \quad (28)$$

$$tr = \frac{0,069 \times L \times n \times mi}{(Tan\alpha \times N \times D) \times \left[ (n \times mi) + \left( \frac{10,5 \times B \times L \times mas \times A}{1000} \right) \right]} \quad (29)$$

Onde:

B – Constante da dimensão do produto;

Dp – Dimensão do produto (diâmetro);

tr – Tempo de residência do produto com o ar de secagem;

L – Comprimento do tambor rotativo;

$\alpha$  – Ângulo de inclinação do tambor;

N – Rotação do tambor (RPM);

n – Número de elemento de volume;

mas – Massa de ar de secagem por segundo (kg/s);

A – Área do diâmetro do tambor.

A bibliografia consultada oferece uma orientação do que já está desenvolvido no mercado e sua aplicação no requisitos teóricos e equações para o dimensionamento. Com base nas pesquisas bibliográficas citadas pode-se dimensionar o equipamento de secagem associados ao levantamento de dados realizados em campo, mencionados em materiais e métodos a seguir.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para definir as propriedades da vagem verde de soja e dos seus resíduos e do método de cálculo necessário para o dimensionamento do equipamento de secagem.

As amostras foram coletadas em uma máquina de pré limpeza, no qual é classificado o grão de soja como produto principal, e a vagem verde e seus resíduos como impurezas. Estas amostras foram coletadas durante o período de safra de 2017 com o objetivo de identificar seu teor de umidade e do seu peso específico.

Com base nos estudos realizados na referência bibliográfica, será selecionado um equipamento de secagem existente no mercado e estar adequado com as características do produto e sua capacidade desejada.

A sistemática de dimensionamento utilizada para atender a capacidade planejada, também é demonstrada neste capítulo levando em consideração sua umidade inicial e final desejada para que seja possível a retrilha da vagem que não foi aberta pela colhedora.

#### 3.1 Coleta de amostras

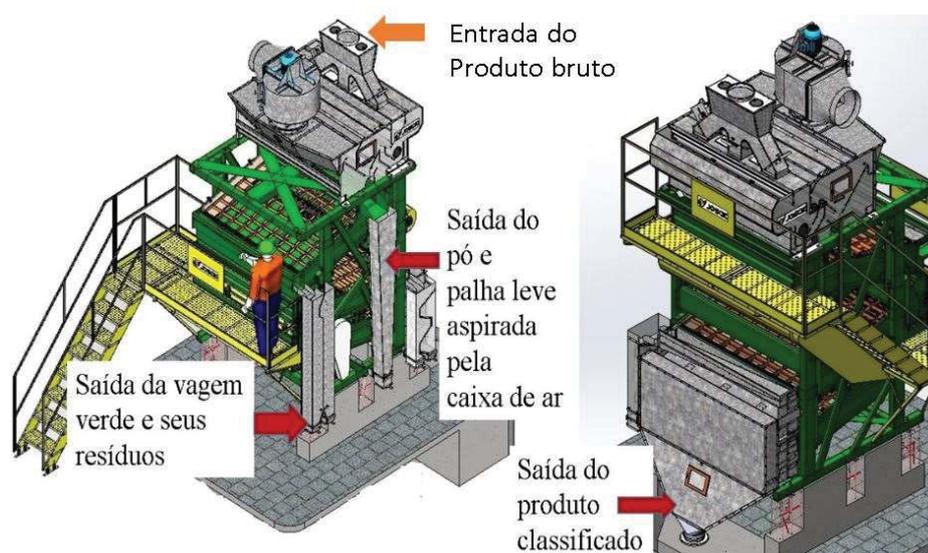
As coletas das amostras foram realizadas de forma aleatória, tendo como premissa duas coletas por semana, sendo uma de manhã e outra à tarde, repetidas por três semanas durante o período principal da safra nos meses de março e abril de 2017 nas unidades de armazenagem de Panambi e condor RS. As determinações do teor de umidade das duas amostras diárias foram realizadas no mesmo dia para identificar o estado que a vagem se encontrava no momento mais próximo à colheita da mesma.

Todas as amostras foram coletadas em uma máquina de pré limpeza, no momento de recebimento do grão nas unidades de armazenagens, enquanto o fluxo de recebimento ocorria do tombador para moega, fita inferior da moega, elevador da moega e então para máquina de pré limpeza. As coletas foram realizadas nas calhas de classificação desta máquina, com objetivo quantificar a umidade e peso específico da vagem verde de soja e seus resíduos da soja conforme ilustrado na Figura 21.

A máquina de pré limpeza, ilustrada na Figura 20, é abastecida pela entrada do produto bruto (soja e seus resíduos) e são classificados por uma peneira vibratória. Normalmente este equipamento classifica o produto bruto em 04 partes a saber:

- Grão de soja livre de impurezas (cerca de 98%), conforme indicado abaixo na bica de saída do produto classificado;
- Poeira sugada por um ventilador (saída do pó e palha leve aspirada);
- Galhos pequenos e leves, vagens leves trilhadas e restos de plantas diversas e;
- Vagem que não foi trilhada (estes dois últimos são expelidos da máquina como vagem verde e seus resíduos).

Figura 20 – Ponto de coleta da vagem verde e seus resíduos



Fonte – JOSCIL, 2017.

### 3.2 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade das vagens e seus resíduos, foram determinados pela norma NBR 11378 (Grãos e sementes não moídos – Determinação do teor de umidade). Esta norma tem como base a retirada de toda a água presente no produto a uma temperatura de 103 °C com variação máxima de +/- 2 °C. O forno deve ter vedação para não permitir a entrada de ar úmido e uma ventilação para fazer a retirada da umidade durante a exposição do produto a esta temperatura de 103 °C, durante 24 horas.

O processo de medição desta umidade se dá pela diferença, em percentual, de medição da massa do produto antes da secagem e após esta secagem. O forno utilizado é da marca Heraeus Instruments, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Forno para secagem de da vagem de soja verde e seus resíduos



Fonte: Autor, 2017.

A amostra de um dia de coleta foi preparada num recipiente tipo “pires”, conforme ilustrado na Figura 22. Cada “pires” foi identificado e pesado com produto antes de inserir no forno para secagem. As medições sempre foram realizadas com a vagem que não foi trilhada em campo e também com todo resíduo de soja.

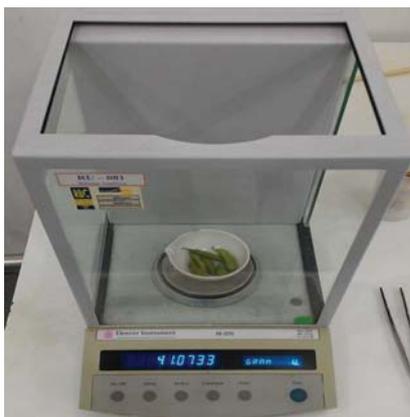
Figura 22 - Vagem verde de soja e seus resíduos



Fonte: Autor, 2017.

O peso da amostra foi realizado numa balança Denver Instruments modelo M-220 ilustrado na Figura 23, com capacidade de pesagem mínima de 0,1 miligramas e máxima de 200 gramas aferida pelo INMETRO.

Figura 23 – Balança de precisão



Fonte: Autor, 2017.

### 3.3 Determinação da densidade

Para determinação do peso específico do resíduo e da vagem, foi definido um recipiente que tenha um volume adequado para dar uma boa acuracidade. Para determinar seu volume, este recipiente foi preenchido com água e, através da medição desta massa de água (massa do recipiente com água menos a massa do recipiente vazio) dividida pelo peso específico da água em  $1000 \text{ kg/m}^3$ , tem-se o volume do recipiente.

Tendo a massa do produto (massa do recipiente com produto menos a massa do recipiente igual a massa de produto) e o volume pode-se definir seu peso específico dividindo a massa do produto pelo volume do recipiente. A balança de marca Urano com precisão de 1 grama foi utilizada para medição do volume e da densidade, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Recipiente para medição da densidade

a) Massa do recipiente



b) Recipiente para medição da densidade do resíduo de soja



Fonte: Autor, 2017.

### 3.4 Seleção do secador

A eficiência térmica de um secador é um atributo de elevada importância. Quanto maior a umidade na colheita do grão, mais energia calorífica se faz necessário para retirar o excesso de água no produto para atingir a condição ideal de armazenagem, fazendo com que a eficiência no uso da energia seja um fator muito relevante na secagem.

Recomenda-se a colheita o mais próximo possível da maturidade fisiológica do grão e sua secagem dever ser imediata, antes da armazenagem a fim de evitar a perda da qualidade do produto ou até mesmo sua deterioração.

Há que se observar ainda a capacidade do equipamento em proporcionar tratamento homogêneo ao produto processado. Sistemas ou equipamentos que tratem de forma desigual, grãos que estejam em locais ou caminhos distintos, devem ser vistos com cuidado para verificar se esta falta de homogeneidade pode ou não causar problemas ao produto ou parte dele.

Também se espera que os sistemas de secagem não causem danos mecânicos no produto, neste aspecto, os principais gargalos são os dispositivos de carga e de descarga.

#### 3.4.1 Secadores de vagens adaptados no mercado

Um dos grandes problemas na secagem de resíduos de soja, ou vagem verde de soja, é garantir que ocorra o fluxo constante do produto. Em secadores do tipo fluxo cruzado ou de cascata não é recomendado a secagem deste produto por estes não terem um bom escoamento, diferente de grãos como, milho, soja, arroz ou trigo.

É muito comum ocorrer o efeito “embuchamento” no fluxo de secagem de vagem ou resíduos de soja e é muito perigoso devido ao alto risco de incêndio provocado pelo aquecimento contínuo do produto ao longo de um grande período, pelo fato deste estar preso no fluxo de secagem dentro do secador. Outro fator de grande importância é a dificuldade de liberar o fluxo do produto, após o “embuchamento”, devido a enorme dificuldade de acesso a parte interna do secador. Este fator descarta todos os secadores de calhas invertidas com formato tipo “V” ou do tipo cascata que representa a grande maioria dos secadores.

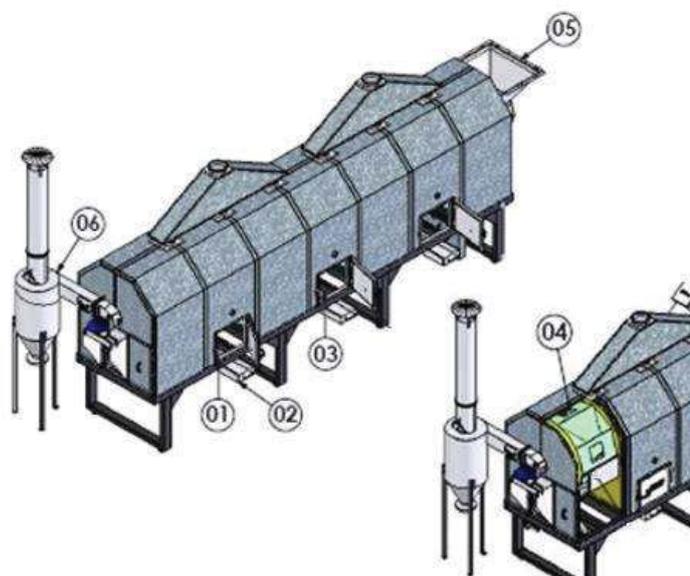
Quanto aos secadores de camada fixa, a grande desvantagem para esta aplicação é que a camada a ser secada permanece estática, o que torna este sistema muito ineficiente devido a necessidade de movimentar o produto durante a secagem, até mesmo porque o objetivo é fazer a secagem de forma contínua. O que elimina também qualquer outro sistema de secagem que não faça o transporte e movimentação/mistura durante o processo de secagem. Devido a grande

massa de água a ser removida, o secador de leite fluidizado também não se aplica devido a sua baixa capacidade de secagem e elevada potência de ventilação.

Para a secagem de vagem verde de soja e seus resíduos, são adaptados secadores rotativos existentes no mercado. Sua maior desvantagem é a baixa ou a própria inexistência de ar quente em contato com o produto, que é o fator principal na secagem a altas temperaturas, tornando este ineficiente para altas remoções de umidade e volumes mais expressivos, não atendendo a demanda necessário para o produtor.

A Figura 25 demonstra o seu princípio de funcionamento. A transferência de calor para o produto é feita de forma indireta, ou seja, o tambor interno aquecido pelas três fornalhas é responsável pela transferência de calor por convecção, além de ser rotativo para realizar a movimentação e transporte do produto. Tem a vantagem de não haver contato direto com o gás da queima e, portanto, pode ser aplicado em secagem de produtos como, por exemplo, ração para animais.

Figura 25 – Secador rotativo agrícola



Fonte: JOSCIL, 2017

- 01-fornalha:** com estruturas em perfis de aço e revestimento interno de tijolos refratários;
- 02-cinzeiro:** depósito de cinzas;
- 03-grelhas:** para este modelo são três portas revestidas de lá de vidro, com grelhas de ferro fundido e tijolo refratário para garantir maior durabilidade;
- 04-tambor interno:** gira a baixa rotação e faz o deslocamento e movimentação no produto através de inclinação do tambor ou hélices internas, forrado com lã de vidro;
- 05-moega de abastecimento:** a ser definido pelo cliente;
- 06-ciclone:** destinado para o ensaque da poeira e partículas muito comuns nesta aplicação.

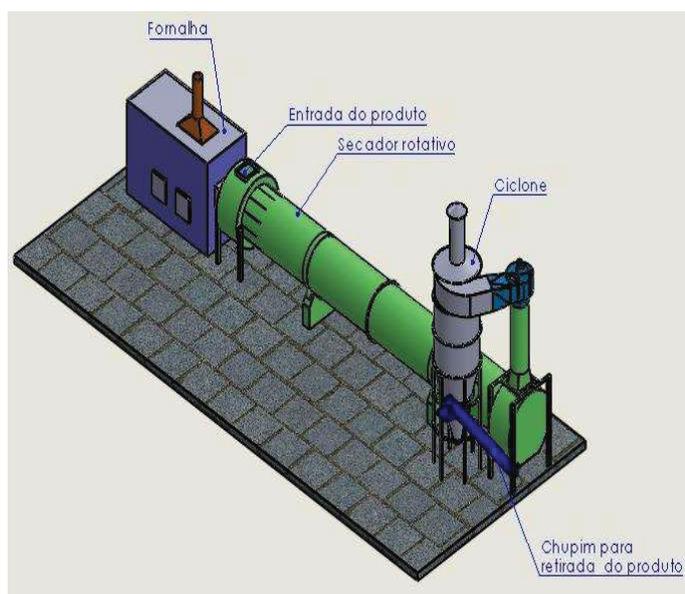
Outro modelo de secador rotativo existente no mercado, conforme ilustrado na Figura 26, tem uma capacidade maior, porém é considerado ineficiente pela alta perda de calor, tanto na passagem do ar de secagem pelas áreas vazias internamente, como pelo aquecimento do tambor rotativo que perde calor ao meio ambiente.

A secagem ocorre pelo ar aquecido passando perpendicularmente por uma cascata de material. A câmara cilíndrica ou tambor rotativo, permanece praticamente na horizontal e possui suspensores internamente, que funcionam como pás, que conduzem os materiais da parte inferior para a parte superior da câmara cilíndrica, para que esta despeje o produto a ser secado em forma de cascata.

O processo de transporte do produto na secagem em tambores rotativos, conforme ilustrado na Figura 26, normalmente é dado na seguinte ordem:

- Aquecimento do ar de secagem na fornalha que pode ser com calor direto ou indireto;
- Entrada do produto através de um transporte com fita, redler, helicóide ou chupim;
- Secador ou tambor rotativo com suspensores para distribuir o produto na parte interna deste tambor permitindo que o ar quente de secagem entre em contato com o produto de forma mais eficiente possível;
- Ciclone para retenção do pó contido no produto e ventilador para sucção do ar de secagem proveniente da fornalha;
- Chupim, ou outro transportador, para retirada do produto e processo posterior a secagem como a retilha da vagem por exemplo.

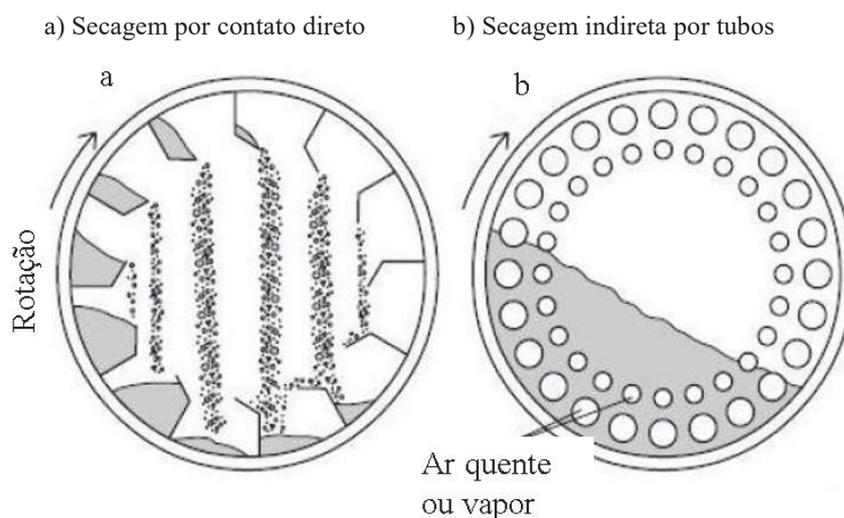
Figura 26 – Secador rotativo Industrial Joscil



Fonte: JOSCIL, 2017.

A parte interna deste secador pode ser de secagem direta, ilustrado na Figura 27, ou de secagem indireta, no qual neste último, o ar quente passa por dentro do tubo que por sua vez faz o contato térmico com o produto a ser secado.

Figura 27 – Secagem por contato direto e indireto



Fonte: Adaptado de NILSON, 2008.

### 3.4.2 Considerações para seleção do secador

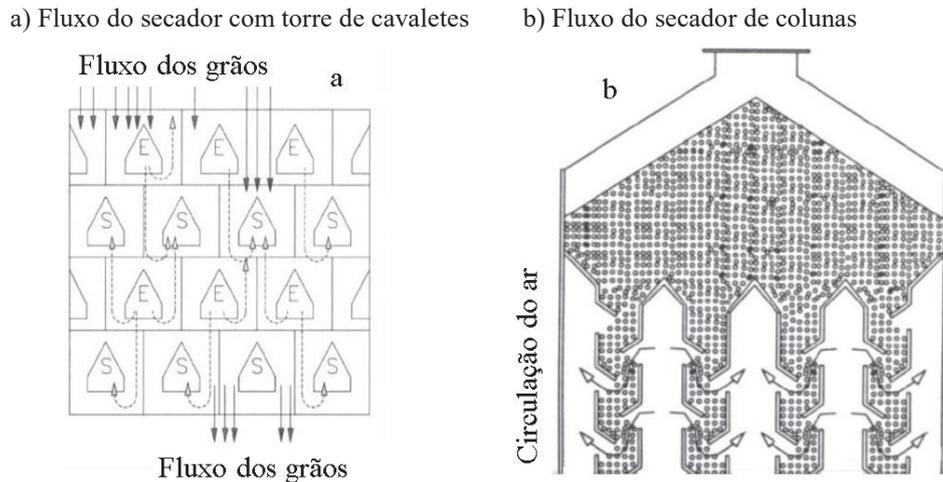
Para atingir a capacidade planejada de seis toneladas por hora na secagem da vagem verde e seus resíduos, na condição da redução de sua umidade de 31% para 18%, é necessário um secador que permita um bom volume do ar de secagem e excelente capacidade de movimentação do material para evitar o “embuchamento”, durante seu transporte no processo de secagem, e o contato do ar de secagem no contorno do produto.

Os secadores rotativos existentes no mercado não atingem esta capacidade, por não estarem projetados para este fim. Os sistemas de secagem por cavaletes ou cascatas não permitem o fluxo da vagem pela gravidade devido aos pequenos espaços entre as peças metálicas não oferecendo a passagem livre suficiente e segura da vagem e de possíveis resíduos misturados no produto.

A Figura 28, ilustra a passagem do produto num secador tipo torre de cavaletes e de colunas de fluxo misto, muito utilizado no mercado para secagem de grãos. Observa-se que nos dois modelos citados, mais usado no mercado devido a sua boa eficiência, não é possível se

utilizar deste conceito de secagem de vagem verde de soja por não garantir o fluxo sem o “embuchamento” do produto.

Figura 28 – Fluxo do secador com torre de cavaletes e de colunas



Fonte: Adaptado de WEBER, 2005.

O secador rotativo existente no mercado pode ser adaptado para a secagem da vagem verde de soja e seus resíduos com algumas modificações, porém para menores capacidades. Por outro lado, com o aumento das capacidades necessárias para atender a demanda, serão necessárias soluções alternativas inovadoras mais eficientes para atingir o resultado desejado.

### 3.5 Procedimento metodológico para dimensionar o equipamento de secagem

A maioria dos produtos agrícolas são colhidos com teores de umidade acima do recomendado para uma armazenagem segura. A secagem visa remover este excesso de umidade através da transferência de calor e massa entre o produto e ar de secagem. Se a secagem for mal conduzida, pode causar a deterioração do produto ou reduzir a sua qualidade (CENTREINAR, 2008).

A secagem é uma operação crítica quando a colheita é antecipada e os grãos ainda tem elevada umidade. A secagem inadequada, ou sua ausência, é a principal causa da deterioração qualitativa dos grãos durante o armazenamento (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001).

Durante a secagem consome-se muita energia, na ordem de 4.000 a 5.000 KJ, para remover cada quilograma de água em excesso. Existem secadores em que este consumo de energia pode superar 8.000 KJ por cada quilograma de água a ser evaporada. Quando se colhe

com elevado teor de umidade, o consumo de energia, somente na etapa de secagem, pode chegar a 60% de toda a energia usada na produção deste grão (BROOKER et al.1992).

### 3.5.1 Temperatura e vazão do ar de secagem

A temperatura de secagem junto ao fluxo de ar, é o principal determinante da velocidade de secagem. O que delimita o uso da temperatura elevada é sua consequência sobre a qualidade dos grãos. A temperatura muito elevada, aumenta a taxa de evaporação da água na superfície dos grãos, porém gera tensões internas que provocam danos mecânicos por trincamento e aumentam a suscetibilidade à quebra dos grãos. Além disso, a alta temperatura causa alterações nos constituintes nutritivos dos grãos, como carboidratos, proteínas e lipídios (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001).

Os equipamentos de secagem representam um alto custo inicial. No caso da secagem dos produtos em fazendas, o problema se agrava porque são usados durante muito pouco tempo, na maior parte do ano ficam parados por serem necessários somente no período de colheita e expedição, o que torna mais difícil a diluição deste investimento. Diferente de unidades de secagem e armazenagem industriais (fábricas de ração por exemplo) que processam produtos durante todo o ano.

A sequência para a determinação do tempo de secagem e quantidade de água a ser removida estão definidas conforme os passos descritos a seguir, fluxograma da figura 30 e também indicados na Tabela 04:

**Passo 01** - Especificar os dados do ar de entrada no local de instalação do equipamento:

- Temperatura ambiente;
- Umidade relativa do ar;
- Pressão atmosférica;
- Temperatura do ar de secagem;
- Vazão de secagem, esta deve ser estimada até que seja atingido o objetivo da capacidade de secagem pela unidade de tempo.

**Passo 02** - Definir os dados de entrada do produto e do ar de saída após secagem:

- Massa inicial a secar por hora;
- Umidade inicial do produto;
- Umidade final desejada;

- Umidade relativa do ar de saída, também estimada até que seja atingido um percentual superior a 80% indicando uma eficiência aceitável de secagem;
- Temperatura de saída do ar após cruzar a massa de grãos.

**Passo 03** - Determinar a quantidade de água a ser removida pela equação 3 e 4, com os dados de entrada do produto;

**Passo 04** - Calcular as propriedades do ar de entrada conforme sequência entre as equações 5 a 11 conforme dados de entrada do ar e pressão do local da instalação do secador;

**Passo 05** - Dimensionar a quantidade de ar seco e ar úmido na entrada do secador, ar da fornalha mais ar de mistura (equação 12 e 13 respectivamente);

**Passo 06** - Conforme equação 14, calcular a entalpia do ar de secagem;

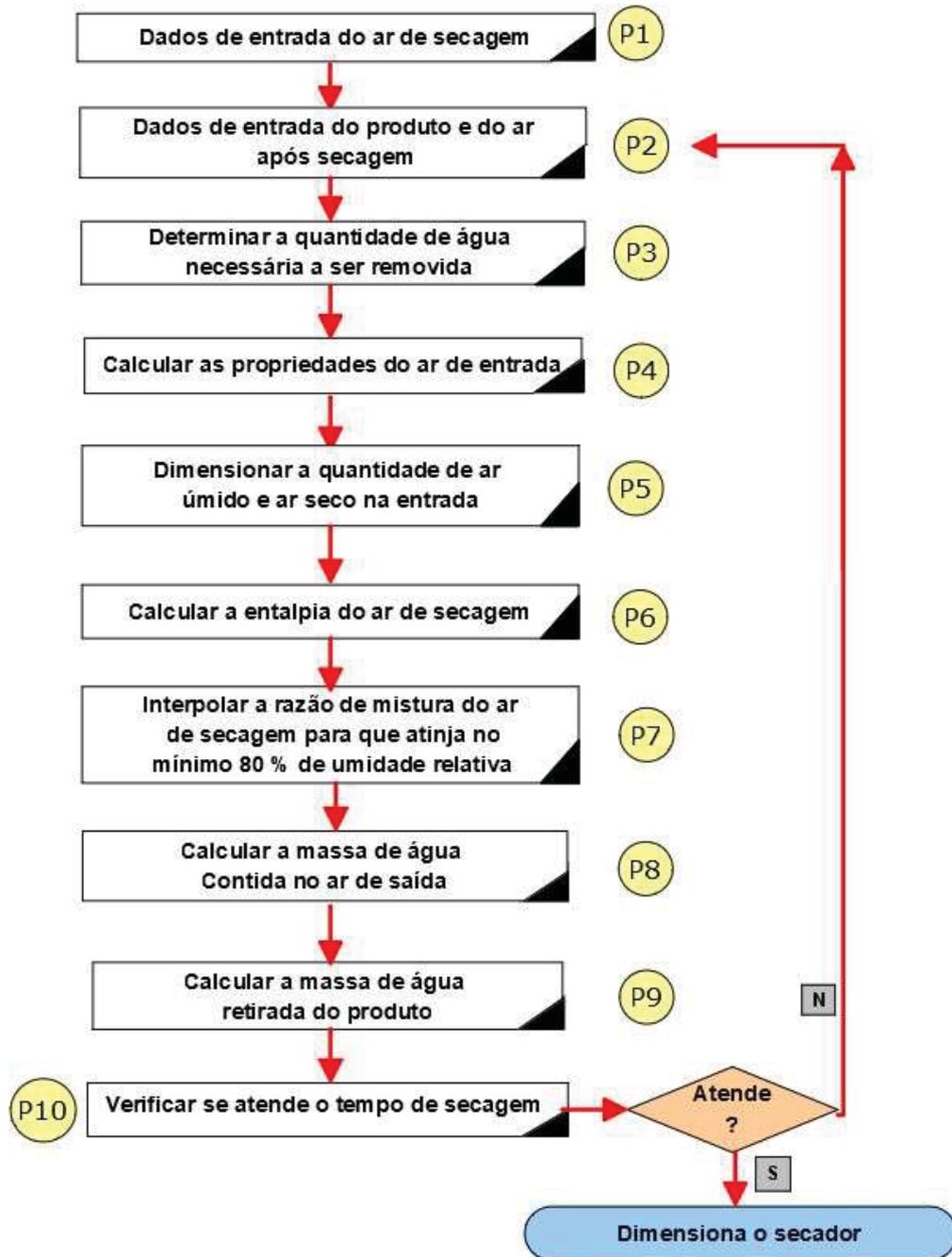
**Passo 07** - Como esta entalpia é constante em todo o processo de secagem, dimensionar a nova razão de mistura possível após a massa de ar cruzar o produto a ser secado. Obs.: Para uma melhor eficiência do secador, a temperatura de saída do ar de secagem deve ser estimada até que a umidade relativa atinja no mínimo 80%, para isto é necessário interpolar as equações 15 a 18;

**Passo 08** - A razão de mistura do ar de saída ( $R_{ms}$ ), após o ar cruzar o produto definida no passo 07, multiplicada pela vazão de massa de ar seco ( $m_{va}$  de entrada), nos fornece a quantidade da massa de vapor de água contida no ar de saída ( $m_{va}$  de saída);

**Passo 09** – A quantidade da massa de água a ser retirada do produto ( $m_{var}$ ) se dá pela subtração da massa de água total retirada conforme parâmetros de secagem pela massa de água que havia no ar natural conforme equação 23 ( $m_{va}$  de saída menos  $m_{va}$  entrada);

**Passo 10** - Para saber o tempo de secagem é realizado o quociente da massa de água a ser retirada do produto (passo 03) pela água retirada do produto conforme parâmetros de secagem (passo 9), conforme equação 24.

Figura 29 – Fluxograma para determinação da quantidade de água removida e tempo de secagem



Fonte: Autor, 2018.

### 3.5.2 Diâmetro, comprimento, rotação e comprimento

Para definição da área e do comprimento do secador, foi necessário levar em consideração a vazão máxima do ar, para que não tenha o araste da vagem verde e seus resíduos provocados pela velocidade ar de secagem.

Para a medição desta velocidade máxima, foram realizados testes na máquina de pré limpeza. A regulagem da vazão do ar foi realizada através de um ventilador com inversor de frequência até que a sua velocidade de sucção atingisse o araste dos resíduos de soja.

A velocidade do ar de aspiração medida na coluna de grão de soja, por um anemômetro indicou que à 7,5 metros por segundo inicia o araste dos resíduos indesejados na região de saída do pó e palha leve aspirada pela caixa de ar ilustrado na Figura 21.

O diâmetro e o comprimento do secador devem ser determinados de forma que a seção interna, área do diâmetro do tambor menos suspensores e espaço ocupado pelo produto, permitam que sua velocidade máxima do ar de secagem não atinja o araste do produto (equação 30, 31 e 32).

A sequência para a determinação da vazão do ar de secagem, tempo de residência e velocidade do ar de secagem estão definidas conforme descrito abaixo e indicados na Tabela 05:

**Passo 11 - Dados do ar de entrada**

- Densidade do produto;
- Calor específico da água e do produto;
- Calor latente de vaporização da água;
- Temperatura inicial do produto;
- Perda (eficiência do processo de secagem, perdas de calor para o ambiente);
- Comprimento, diâmetro e número de elementos de volume do secador;
- Rotação e ângulo de inclinação;
- Diâmetro da partícula ou perímetro do produto dividido por 3,1415.

**Passo 12** – Calcular o volume interno do secador ( $v_s$ ), volume do produto ( $v_p$ ) e volume livre ( $v_l$ ) conforme equações a seguir;

$$v_s = \frac{3,1415 \times D^2 \times L}{4} \quad (30)$$

$$v_p = \frac{m_i}{\rho_e} \quad (31)$$

$$v_l = v_s - v_p \quad (32)$$

Onde:

D – Diâmetro interno do tambor;

L – Comprimento útil de secagem.

**Passo 13** – Calcular a quantidade de calor necessário ( $Q_c$ ) pela equação 25 e, de acordo com o fator de eficiência do processo de secagem e de calor perdido, recalculando a quantidade de calor ( $Q_{cf}$ ) e através deste a vazão de ar necessária ( $Q_{es}$ ) conforme a equação 27;

**Passo 14** – Dimensionar a área livre da seção circular do tambor ( $A_l$ ) para apurar a velocidade de passagem do ar de secagem ( $v_{as}$ ). Esta velocidade não pode ser superior a 7,5m/s para que não ocorra o araste do produto por este ar de secagem;

$$A_l = \frac{v_l}{L} \quad (33)$$

$$v_{as} = \frac{Q_{as}}{A_l} \quad (34)$$

Onde:  $Q_{as}$  é a Vazão do ar de secagem.

**Passo 15** – Calcular:

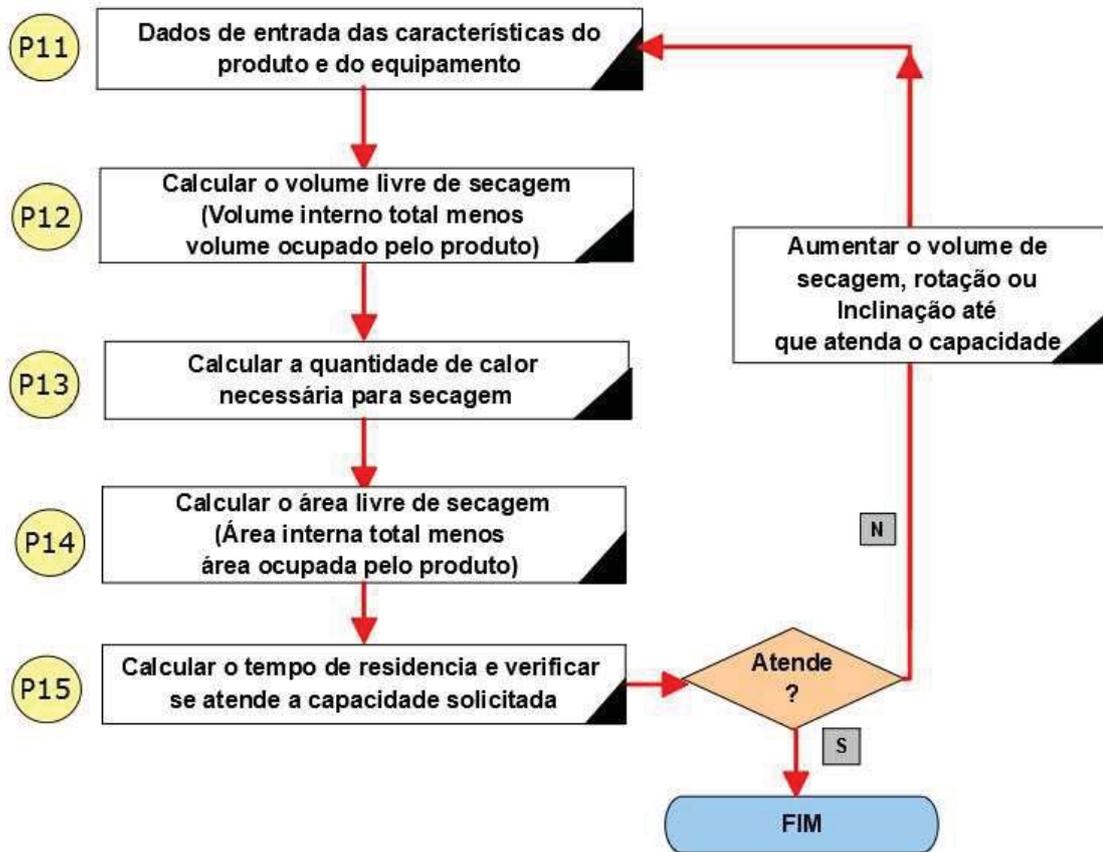
- A constante de dimensão da partícula ( $B$ ) conforme a equação 28;
- A vazão mássica ( $q_m$ ) conforme equação 35;
- Área da seção circular do tambor ( $A_s$ ) conforme equação 36 e;
- O tempo de residência do produto em contato com o ar de secagem ( $t_r$ ) conforme equação 29.

$$q_m = \frac{m_{as} + m_{va}}{3600} \quad (35)$$

$$A_s = \frac{3,1415 \times D^2}{4} \quad (36)$$

A Figura 30 a seguir, ilustra um fluxograma resumindo os passos para o dimensionamento do equipamento de secagem. Caso as dimensões do diâmetro do tambor, comprimento, rotação e ângulo de inclinação do tambor rotativo não atendam a capacidade desejada, torna-se necessário voltar a etapa do passo 11 (P11) e alterar as dimensões ou parâmetros do equipamento, até que seja atendido a capacidade planejada.

Figura 30 – Fluxograma para dimensionamento do equipamento



Fonte: Autor, 2018.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pouco estudos e análises se encontram sobre as propriedades de secagem da vagem verde de soja e seus resíduos, no momento do recebimento deste produto nas unidades de beneficiamento e armazenagem. Fatores importantes como o teor médio de umidade inicial, densidade e curvas características de secagem não foram encontradas para auxiliar na definição e dimensionamento do equipamento.

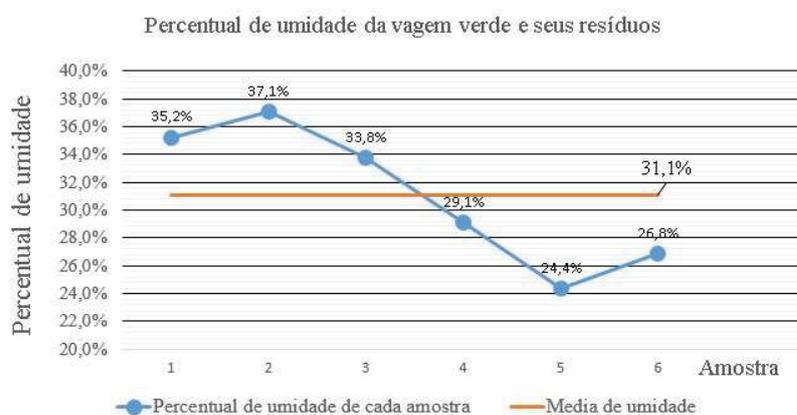
Na falta destes dados foi necessário coletar amostras nas unidades de armazenagem para avaliar a vagem verde e seus resíduos durante o recebimento para poder quantificar o teor de umidade e sua densidade aliado a uma pesquisa bibliográfica na definição do calor específico.

### 4.1 Teor de umidade da vagem verde e seus resíduos

Foram realizadas seis coletas para amostra, sendo uma de manhã e outra a tarde durante 3 semanas no período principal de colheita. Com o avanço da maturidade da planta foram identificadas consideráveis variações de umidade.

Conforme ilustrado na Figura 31, os teores de umidade na primeira semana, (amostras 1 e 2), apresentaram uma umidade de 35,2 a 37,1 %. Na segunda semana, (amostras 3 e 4) apresentaram um teor de umidade de 29,1 a 33,8 %. Na última semana (amostras 5 e 6) já houve uma redução de umidade bem significativa de 24,4 a 26,8 %. Fazendo a média aritmética entre as 6 amostras obtêm-se um valor de 31,1 %, com desvio padrão de 4,3 % e coeficiente de variação de 13,5 %.

Figura 31 – Medição do percentual de umidade



Fonte: Autor, 2017.

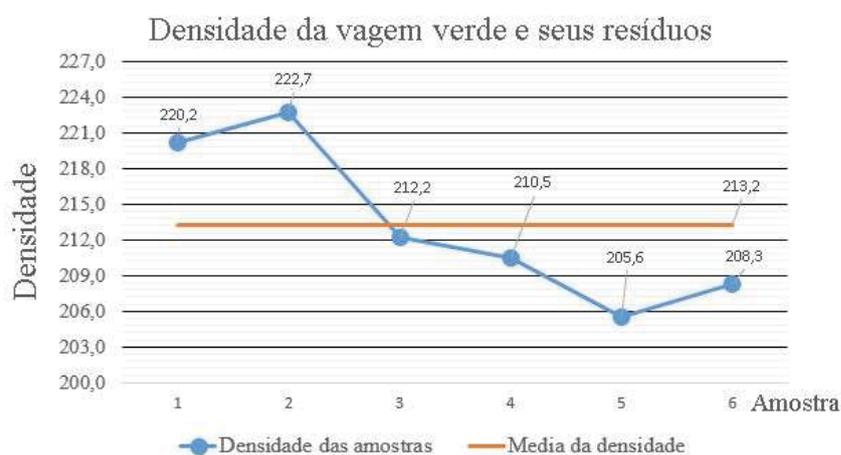
## 4.2 Densidade da vagem verde de soja e seus resíduos

A densidade é um dado importante para que se possa definir o volume de material a ser transportado e secado. Durante o dimensionamento do equipamento é necessário definir o volume que determinado produto ocupa nos equipamentos durante seu transporte e sua secagem.

Conforme ilustrado na Figura 32, foram realizadas medições de seis amostras para definição da densidade. A amostra 1 e 2 coletadas na primeira semana com a vagem verde de soja e resíduos com teores de umidade mais elevados ficaram em 220,2 a 222,7 kg/m<sup>3</sup>, as densidades das amostras 3 e 4, coletadas na segunda semana da safra, ficaram entre 212,2 e 210,5 kg/m<sup>3</sup>, enquanto as densidades com os menores teores de umidade coletadas na última semana ficaram entre 205,6 e 208,3 kg/m<sup>3</sup>.

Observa-se que o teor de umidade diminui entre a primeira e última semana em que foram coletadas as amostras. Como houve o aumento da maturidade da planta, ou seja, com a redução da umidade, tem-se consequentemente a diminuição da densidade entre a primeira e a última amostra. A média aritmética da densidade ficou em 213,2 kg/m<sup>3</sup>, com desvio padrão de 4,4 kg/m<sup>3</sup> e coeficiente de variação de 0,2 %.

Figura 32 – Medição da densidade



Fonte: Autor, 2017.

## 4.3 Dimensionamento do secador rotativo e seus detalhes

Para que seja atingida a capacidade de secagem com seis toneladas por hora, na condição de redução da umidade média de 31,1% para 18%, é necessário fazer com que o

dimensionamento do secador esteja adequado a estes parâmetros médios de umidade e densidade conforme ilustrado nos gráficos das Figuras 30 e 31.

A distribuição do produto dentro do secador deve ser o mais uniforme possível para que o ar de secagem consiga absorver o máximo de umidade, assim como a correta temperatura, vazão do ar de secagem e tempo de residência no processo são parâmetros fundamentais para secagem eficiente.

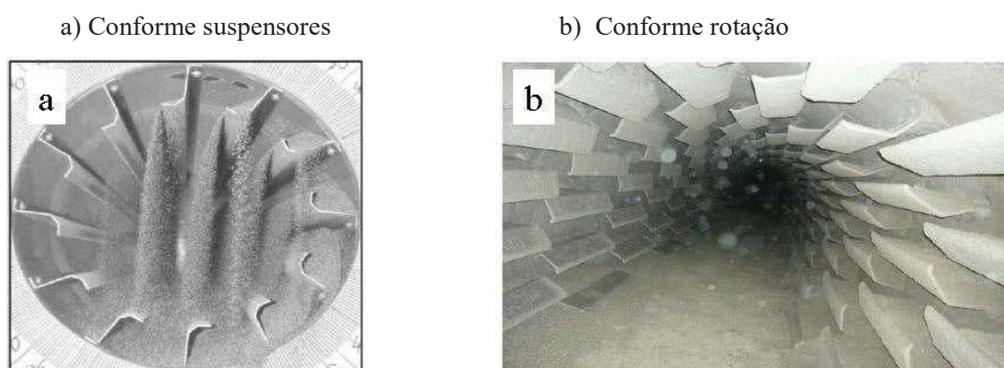
#### 4.3.1 Suspensores

O arranjo dos suspensores é uma das características peculiares para este estudo de secagem da vagem verde de soja e seus resíduos. Os suspensores fixados na parte interna do tambor, conforme ilustrado na Figura 33, deve permitir uma distribuição contínua da suspensão do produto para que este esteja em contato constante com o ar de secagem.

O secador existente no mercado, ilustrado na Figura 32, possui uma área muito grande onde não há o contato do ar com o produto, oferecendo em certos pontos, a passagem livre do ar de secagem, permitindo que parte deste ar quente seja perdido para o meio ambiente perdendo boa parte da sua eficiência.

Observa-se na Figura 32a que o lado esquerdo do tambor não tem produto ou quase inexistente, devido aos suspensores não garantir a distribuição nesta área. Na Figura 32b o produto pode permanecer, em grande parte, no fundo do secador rotativo permitindo ainda mais a passagem livre do ar de secagem.

Figura 33 – Área de contato para secagem



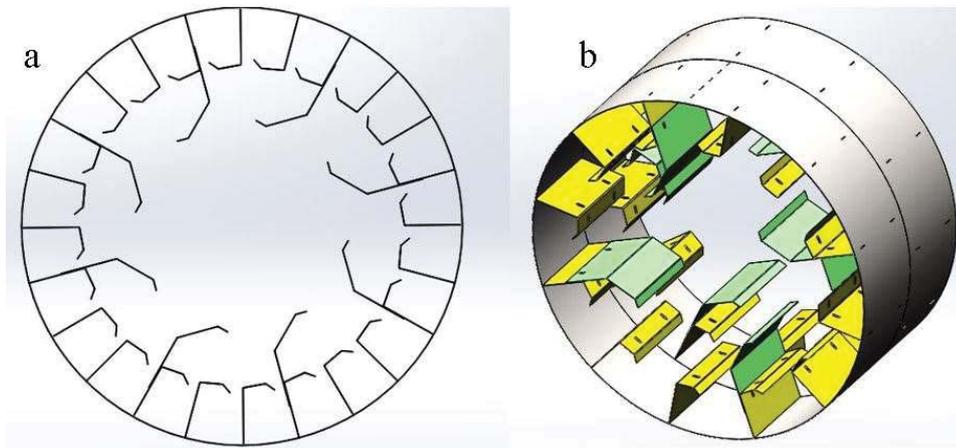
Fonte: Adaptado de NILSON, 2008.

Na parte interna do secador em estudo, foi necessário projetar suspensores centrais maiores e alterar o arranjo destes, para que ocorra uma melhor distribuição do produto e assim melhorar a eficiência na transferência de calor entre o ar aquecido e o material a ser secado, diferente da distribuição ineficiente ilustrado na Figura 34.

Este perfil foi projetado e simulado no software Autocad (ilustrado na Figura 33), para que fosse possível prever na engenharia, a distribuição do produto em vários ângulos de posicionamento dos suspensores. A função principal desta simulação, é garantir que os suspensores permitam que o produto seja todo arrastado do fundo do tambor e permaneça em suspensão até que sua queda seja de forma homogênea, ocupando toda a área de secagem do tambor.

Após o detalhamento dos desenhos, fabricou-se um protótipo em escala real dos suspensores e do diâmetro do tambor, porém no comprimento uma fatia de 0,5 metros. O objetivo deste protótipo é comprovar a distribuição homogênea do produto na secção circular do tambor, a uma determinada rotação. A rotação do tambor que proporcione a melhor condição de homogeneidade deve ser selecionada.

Figura 34 - Área de contato para secagem modificada

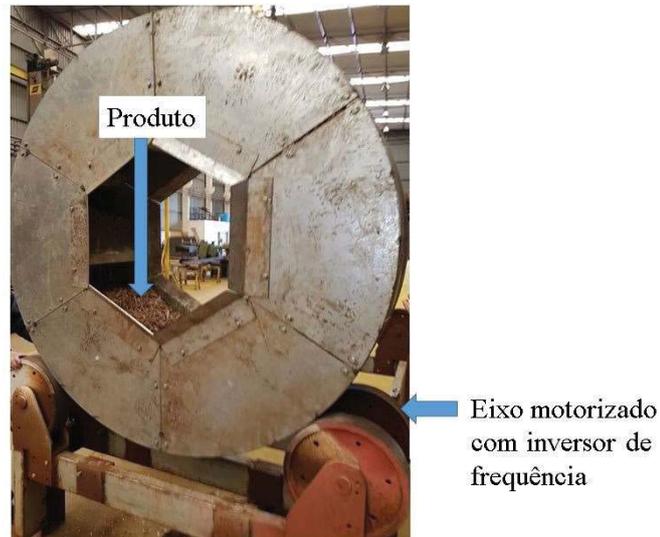


Fonte: Autor, 2017.

O protótipo foi acondicionado em 4 roldanas conforme ilustrado na Figura 34. Duas delas acopladas em um moto redutor com inversor de frequência, para variação da rotação até atingir a distribuição do produto da forma mais uniforme possível. Conforme aumenta a rotação no tambor, a força centrífuga também aumenta, fazendo que o produto seja lançado mais para frente até que seja atingido a melhor distribuição.

A quantidade de produto acondicionado neste protótipo, apresentado na Figura 35, é proporcional a sua dimensão, ou seja, este teste foi utilizado tanto para validar a eficiência dos suspensores como o volume a ser ocupado pelo produto para confirmar a capacidade estática do equipamento.

Figura 35 – Protótipo para avaliação dos suspensores



Fonte: Autor, 2017.

Na Figura 36 pode-se observar que existe uma distribuição do produto de forma homogênea na câmara do cilindro do secador (tambor rotativo) a uma rotação de 6 RPM, evidenciando-se a correta distribuição e dimensionamento dos suspensores conforme simulado na engenharia.

Figura 36 – Distribuição do produto pelos suspensores



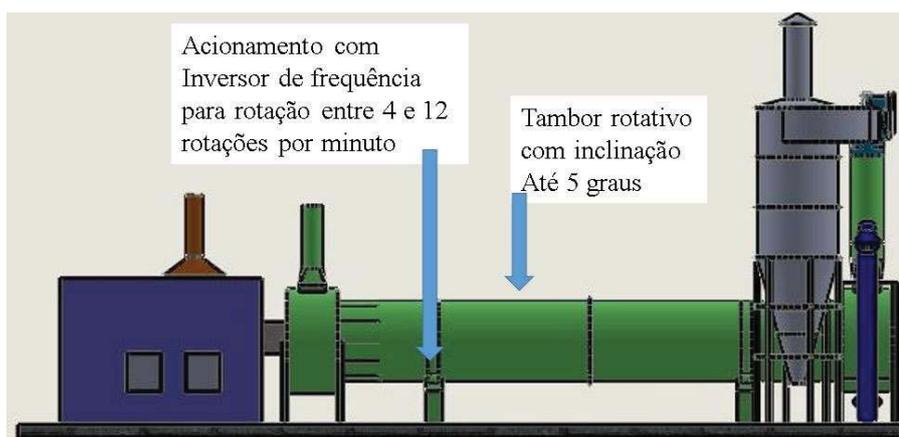
Fonte: Autor, 2017.

### 4.3.2 Ângulo de inclinação e rotação

A combinação da rotação e inclinação do tambor, ilustrado na Figura 37, é de fundamental importância na determinação do tempo de residência do produto dentro do secador e sua capacidade de secagem. As condições de regulagem da inclinação e da rotação do tambor permitem configurar as situações abaixo citadas:

- Aumentar a inclinação e diminuir a rotação: quando é necessário reduzir a força centrífuga para melhorar a distribuição uniforme do produto e manter o tempo de secagem;
- Aumentar a inclinação e aumentar a rotação: quando é necessário ampliar a força centrífuga para melhorar a distribuição uniforme do produto na câmara de secagem e reduzir o tempo de residência do produto no secador;
- Reduzir a inclinação e diminuir a rotação: quando é necessário reduzir a força centrífuga para melhorar a distribuição uniforme do produto na câmara de secagem e aumentar o tempo de residência para uma secagem mais branda;
- Reduzir a inclinação e aumentar a rotação: quando é necessário aumentar a força centrífuga para melhorar a distribuição uniforme do produto na câmara de secagem e manter o tempo de secagem.

Figura 37 Inclinação do tambor e variação da rotação



Fonte: Autor, 2017.

Devido a grande variação do teor de umidade da vagem entre as primeiras e últimas semanas do cultivo, conforme ilustrado na Figura 31, pode-se projetar a parte elétrica com inversores de frequência. Desta forma, parâmetros de secagem como temperatura, vazão do ar

de secagem e rotação do tambor, podem ser controlados, podendo reduzir os tempos de secagem ou ampliar sua capacidade de acordo com a necessidade.

Para que seja possível estes ajustes da variação de capacidade, os transportadores que abastecem o secador também devem ter esta condição de regulagem, afinal são eles que determinam a capacidade do equipamento pela sua quantidade que transportam e abastecem o secador.

#### 4.3.3 Definição dos parâmetros de secagem

Para maior agilidade no dimensionamento dos parâmetros de secagem, faz-se necessário o uso de uma planilha para gerar os resultados de acordo com as equações e sequências mencionadas no capítulo 3. A Tabela 4 ilustra o dimensionamento de cada variável para que seja possível a avaliação rápida em se alterando um parâmetro.

Os dados de entrada (passo 01) como temperatura ambiente, umidade relativa do ar natural, ar natural e pressão atmosférica são coletados em campo. A temperatura e vazão do ar de secagem são estimados até que seja atendido a capacidade desejada.

Os dados de entrada do produto (passo 02) como massa e umidade inicial, devem ser fornecidos pelo usuário do equipamento. A umidade final, deste produto em especial, é recomendada em 18%, que é a condição em que a vagem pode ser trilhada.

Para uma boa eficiência do secador, a umidade relativa de saída do ar de secagem deve ficar acima de 80%, para validar a eficiência de secagem pelo equipamento. Recomenda-se uma temperatura de 10 °C acima da temperatura ambiente para o ar de secagem após cruzar a massa de grãos.

Os dados de entrada do ar ambiente são dimensionados conforme as equações citadas na Tabela 4 na primeira coluna à esquerda, assim como os dados de saída do ar de secagem e do produto. Na última linha da Tabela 4, tem-se a quantidade de massa de vapor de água removida com base nos parâmetros de entrada conforme equação 23 e o tempo de secagem conforme dimensionado na equação 24.

Tabela 4 - Dimensionamento dos parâmetros de secagem

<b>Determinação do tempo de secagem e quantidade de água a ser removida</b>									
<b>Dados Entrada do ar (Passo 01)</b>					<b>Dados entrada do produto e saída do ar (Passo 02)</b>				
Temperatura ambiente do local	25	°C	Massa inicial	6.000	kg/h				
Umidade relativa do ar local	75%	%	Umidade inicial	31%	%				
Pressão atmosférica	950	Bar	Umidade final desejada	18%	%				
Temperatura do ar de secagem	80	°C	Umidade relativa do ar de saída	83%	%				
Vazão do ar de secagem (Qas)	68.500	m³/h	Temperatura de saída	36	°C				
<b>Dados de entrada do ar ambiente</b>					<b>Dados de saída do ar e do grão</b>				
Equação	Valor	Unidade	Passo	Equação	Valor	Unidade	Passo		
5	pvs= 31,67	Bar	P4	3	mf= 5.048,8	kg (após secagem)	P3		
6	pv= 23,76	Bar	P4	4	mar= <b>951,2</b>	kg (agua a remover)	P3		
8	dva= 0,21	kg d'agua/m³ de ar	P4	14	h= 122.834	J/kg de ar seco	P6		
9	Rm= 0,016	kg d'agua/kg ar seco	P4	15	Rms= 0,028	kg d'agua/kg ar seco	P7		
10	das= 1,08	kg ar seco/m³ de ar	P4	16	pv= 40,89	Bar	P7		
11	Ve= 0,92	m³ ar/kg de ar seco	P4	17	pvs= 49,30	Bar	P7		
12	mas= 74.134,8	kg de ar seco/hora	P5	18	UR= 83%	%	P7		
13	mva= 1.182,7	kg vapor d'agua /hora	P5	13	mva= 2.073,9	kg vapor d'agua /hora	P8		
<b>Massa de agua removida durante o processo de secagem em uma hora (mvar) e tempo de secagem (tsec) para a quantidade total especificada</b>									
23	mvar= <b>891,20</b>	kg vapor de agua/hora	P9	24	tsec= <b>1,07</b>	Horas de secagem	P10		

Fonte: Autor, 2017.

De acordo com os dados de entrada do ar de secagem (passo 1), da condição de entrada produto e da saída do ar de secagem (passo 2), consegue-se dimensionar a quantidade de vapor de água retirada do produto conforme equação 23. Para atender esta capacidade, a quantidade de água a ser removida é de 951,2 kg/hora. Conforme os parâmetros de secagem calculados têm-se uma condição de retirar 891,2 kg/hora, resultando em 1,07 horas de secagem em uma capacidade de 6 toneladas por hora, com uma redução de umidade de 31% para 18%.

#### 4.3.4 Definição das dimensões do tambor rotativo e do tempo de residência

Conforme as equações de Iguaz et al. (2003) o tempo de contato do ar de secagem com o produto é um fator essencial para o dimensionamento da carga estática do secador.

Para o dimensionamento do diâmetro do tambor rotativo (câmara de secagem), deve-se levar em consideração, o volume ocupado pelo produto e a área livre para passagem do ar com velocidade máxima de 7,5 m/s para não causar o araste dos resíduos de soja.

A rotação do tambor deve estar condicionada à distribuição uniforme do produto na câmara de secagem e, junto ao ângulo de inclinação garantir o tempo de residência calculado para atingir a condição e capacidade de secagem desejada.

A determinação da vazão do ar de secagem, tempo de residência e a velocidade do ar, ilustrados na Tabela 5, leva em consideração os seguintes dados:

- A densidade de 213,2 kg/m<sup>3</sup>, determinada pela média das medições realizadas nas amostras coletadas conforme indicado na Figura 30;
- O calor específico da vagem foi determinado conforme Figura 7, fazendo a média entre 2 a 3 KJ/kg °C e transformando em Kcal/ kg °C. A conversão KJ para Kcal é de 0,238846, ou seja, 2,5 vezes o fator de conversão corresponde a 0,597 Kcal/ kg °C. Comparando este mesmo fator com a soja tem-se 0,47 Kcal/ kg °C. Significa afirmar que a dificuldade de secar a vagem é 27% superior a secagem da soja;
- O calor latente de vaporização da água é 540 Kcal/kg, a temperatura média inicial do produto em 20 °C e a perda na eficiência do processo de secagem mais a perda de calor para o ambiente foi estimado em 30%, conforme Milman, 2002;
- Os dados de comprimento, diâmetro do tambor, rotação e inclinação foram sendo estimados na planilha Excel, até atingir a capacidade de secagem desejada de 6.000 kg/hora, numa umidade inicial de 31,1% (média de umidade encontrada nas amostras) para 18% que é a umidade que a colheitadeira permite a abertura da vagem para reaproveitamento do grão;
- Na equação 28, o item “B” é uma constante. A vazão mássica (qm) conforme equação 35, é a soma da massa de ar seca mais massa do vapor de água;
- O número de elementos de volume do secador é 1, por haver somente uma câmara de secagem. Para o diâmetro da partícula deve ser considerado o perímetro da vagem dividido por 3,1415 (pi), tem pouquíssima influência no dimensionamento;
- O volume de secador (vs) conforme equação 30, considerando a área interna vezes o comprimento útil do tambor. O volume do produto é a divisão da massa inicial pelo peso específico. Com a diferença entre o volume do tambor e o volume do produto tem-se o volume livre (vl);
- A quantidade de calor necessária a secagem (Qc) é calculada conforme equação 25. Deve-se considerar uma perda neste processo com um incremento na quantidade de calor

necessária ( $Q_{cf}$ ). Com base neste dado mais temperatura inicial e do ar de secagem pode-se calcular a vazão do ar de secagem necessária ( $Q_{as}$ );

- A área da secção transversal dá-se pela equação 36, considerando-se o diâmetro interno do tambor. O tempo de residência é calculado conforme equação 29;

- O volume livre ( $V_l$ ) dividido pelo comprimento do tambor fornece a área livre ( $A_l$ ) da secção circular do tambor. Através da vazão do ar de secagem ( $Q_{as}$ ) dividido pela área livre obtém-se a velocidade do ar de secagem ( $v_{as}$ ).

Tabela 5 - Cálculo das dimensões do secador

Determinação da vazão do ar de secagem, tempo de residência e velocidade do ar (Passo 11)									
Densidade do produto		213,2	kg/m <sup>3</sup>	Comprimento do secador		18	m		
Calor específico d'água		1	Kcal/kg <sup>0</sup> C	Diâmetro do tambor		2,40	m		
Calor específico do produto		0,597	Kcal/kg <sup>0</sup> C	Número de elementos de volume		1,0	-		
Calor latente de vaporização d'água		540,0	Kcal/kg	Rotação do tambor		6,0	RPM		
Temperatura inicial do produto		20	<sup>0</sup> C	Ângulo de inclinação		5,0	<sup>0</sup>		
Perda		30%	-	Diâmetro da partícula		19.000	µm		
Equação	Valor	Unid.	Passo	Equação	Valor	Unid.	Passo		
30	$v_s=$	81,4	m <sup>3</sup>	P12	28	$B=$	0,0363	-	-
31	$v_p=$	28,1	m <sup>3</sup>	P12	35	$q_m=$	20,92	kg/s	P15
32	$v_l=$	53,3	m <sup>3</sup>	P12	36	$A_s=$	4,52	m <sup>2</sup>	P15
25	$Q_c=$	828.697	Kcal/h	P13	29	$t_r=$	<b>1,06</b>	Horas	P15
26	$Q_{cf}=$	1.077.306	Kcal/h	P13	33	$A_l=$	3,0	m <sup>2</sup>	P14
27	$Q_{as}=$	<b>68.487</b>	m <sup>3</sup> /h	P13	34	$v_{as}=$	<b>6,4</b>	m/s	P14

Fonte: Autor, 2017.

A vazão do ar de secagem de 68.487 m<sup>3</sup>/h, o tempo de residência do produto na câmara de secagem de 1,06 horas e velocidade do ar de secagem de 6,4 m/s que cruza pela massa do produto, demonstra o atendimento aos dados de capacidade e umidade desejados.

Para conferência destes valores, fez-se um comparativo entre a sistemática apresentada neste estudo e a forma empírica utilizada por alguns fabricantes tradicionais de secadores usando como referência a soja.

A Tabela 6 comprova os valores com pequenas diferenças, devido as propriedades de secagem da vagem verde de soja e seus resíduos não serem iguais a soja. Comparou-se os dados principais de secagem.

A forma de cálculo do volume é a mesma. O peso específico levou-se em consideração a média de 213 kg/m<sup>3</sup>, assim como os mesmos dados de umidade final e inicial desejados no produto para este estudo.

A quantidade de água a ser evaporada também permaneceu a mesma, para este cálculo não se considera o tipo de produto e sim a quantidade de água total a ser removida para atingir-se a umidade final desejada.

O calor necessário para evaporar esta quantidade de água por hora, teve uma pequena alteração por este ter influência no tipo de produto a ser secado e no rendimento do equipamento. No dimensionamento da vagem e seus resíduos obteve-se 1.077.306 Kcal/h, enquanto na sistemática de cálculo do fabricante tem-se 906.376 Kcal/h, uma diferença de 15,9%.

Tabela 6 – Sistemática de cálculo de um fabricante de secadores e fornhalhas

<b>Cálculo e dados técnicos de secadores</b>		
<b>Capacidade do secador</b>	<b>6,0</b>	<b>Ton/hora</b>
Produto	soja	-
Volume do cereal	28.169,01	m <sup>3</sup>
Peso específico	0,213	Ton/m <sup>3</sup>
Peso do produto	6.000	kg
Umidade inicial	31	%
Umidade final	18	%
<b>1 – Cálculo do percentual de água a ser evaporada</b>		
Água a ser evaporada	15,85	%
<b>2 – Cálculo do peso da água a evaporar por hora</b>		
Peso da água	951,22	kg
<b>3 – Calor necessário para evaporar a água</b>		
Calor teórico para evaporar água livre	667	kcal/kg
Rendimento	0,70	-
Calor	906.376	kcal/h
<b>4 – Cálculo da vazão de ar para a secagem</b>		
Q (vazão de ar)	61.071	m <sup>3</sup> /h
t1 (temperatura de ar ambiente)	25	°C
t2 (temperatura do ar de secagem)	80	°C
& (rendimento)	1,05	-

Fonte: Adaptado do fabricante, 2017

A vazão de ar calculada no estudo de 68.500 m<sup>3</sup>/hora enquanto no fabricante tem-se 61.071 m<sup>3</sup>/hora, com uma diferença de 10,8%. O incremento da vazão de ar é devido a maior dificuldade de secagem da vagem e da maior perda de calor pelo equipamento.

#### 4.4 Sugestões para desenvolvimentos futuros

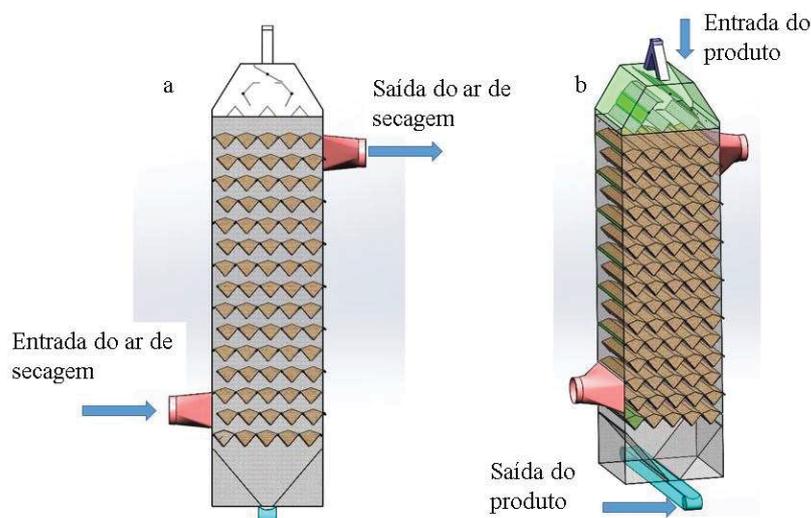
O secador rotativo tem vantagens sobre demais secadores devido seu transporte ou movimentação do produto se adaptar a diversos produtos por mais diferenciados que sejam. Pode-se secar areia, argila, fertilizante, café e neste caso resíduos de soja, como também podem ser secados produtos bem tradicionais como soja, milho, trigo, arroz e assim por diante. Pode-se atender uma gama muito grande de produtos diferenciados e ainda permitindo uma boa uniformidade de secagem.

Algumas desvantagens como uma menor eficiência energética, alto custo de investimento, produto pode ficar sujeito a danos na camada externa e a vida útil mais reduzida do equipamento, necessidade de manutenções mais frequentes, fazem com que seja necessário desenvolver um trabalho futuro que atenda melhor ainda a secagem da vagem verde e seus resíduos com sua peculiaridade da dificuldade de transporte deste durante sua secagem e movimentação.

A Figura 38 ilustra um sistema diferenciado dos conceitos existentes no mercado e inclusive do secador rotativo. A entrada do ar de secagem provém de uma fornalha e o ventilador, alocado na saída do ar de secagem, faz a sucção do ar quente, princípio similar ao secador de coluna existente no mercado (Figura 38a).

A entrada do produto, Figura 38b, dá-se no funil superior e a descarga é realizada por um transportador tipo rosca helicoidal.

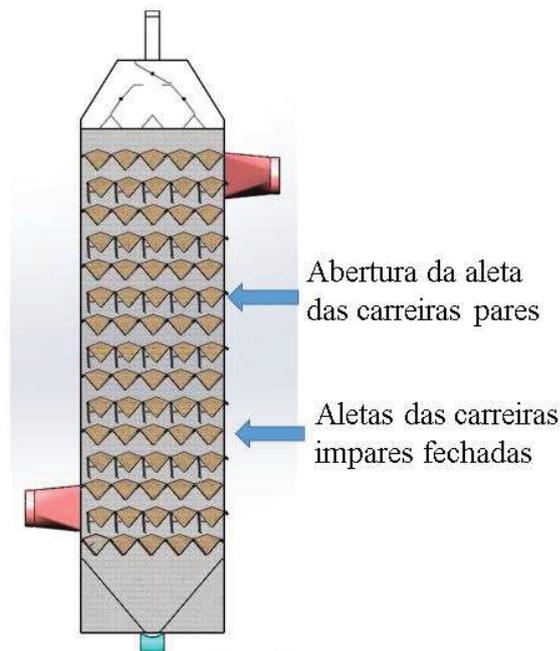
Figura 38 – Secador de vagem verde e seus resíduos em coluna



Fonte: Autor, 2017.

Seu princípio de movimentação interna baseia-se em caçambas com chapas perfuradas para passagem do ar de secagem. Cada caçamba tem uma aleta de abertura para o despejo do produto para camada seguinte abaixo. Enquanto as linhas de caçambas pares fazem a abertura das aletas, as camadas ímpares permanecem fechadas para receber o produto. Desta forma as camadas pares ficam vazias e recebem o produto assim que ocorrer a aberturas das camadas das caçambas ímpares, conforme ilustrado na Figura 39.

Figura 39 – Princípio de movimentação do produto

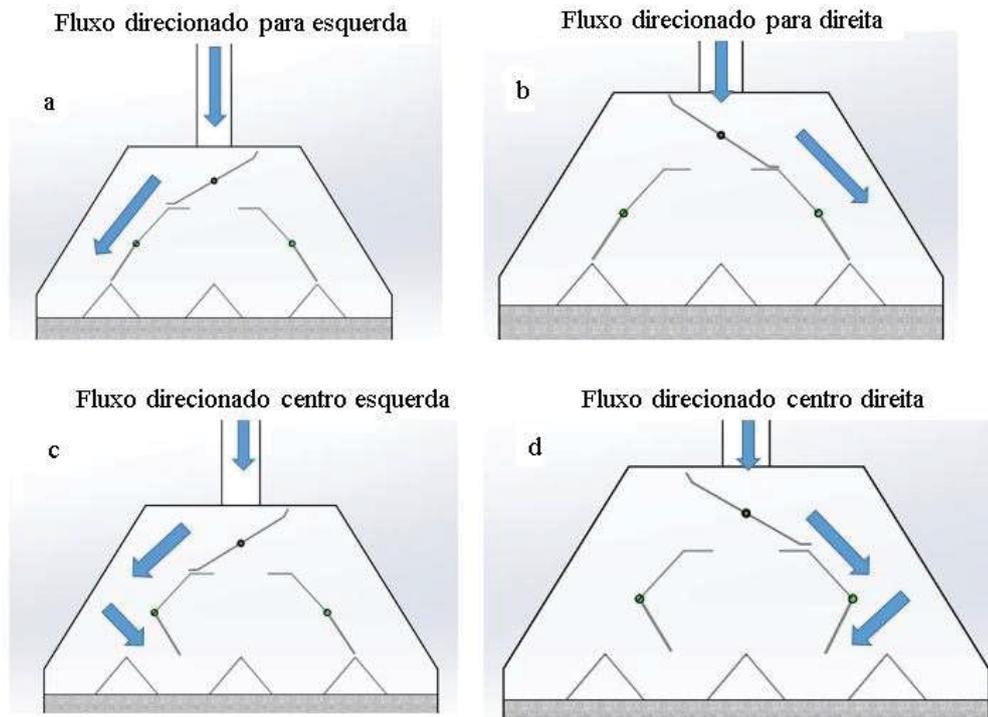


Fonte: Autor, 2017.

A alimentação no funil superior e a distribuição do produto para alimentar as caçambas faz-se com três aletas conforme indicado na Figura 39, com a seguinte sequência:

- a) Aletas direcionadas para preencher a caçamba do lado esquerdo, Figura 40a;
- b) Aletas direcionadas para preencher a caçamba do lado direito, Figura 40b;
- c) Aletas direcionadas para preencher a caçamba do lado central esquerdo, Figura 40c;
- d) Aletas direcionadas para preencher a caçamba do lado central direito, Figura 40d.

Figura 40 – Alimentação e distribuição da entrada do produto



Fonte: Autor, 2017.

Com este sistema de distribuição estima-se que, a vagem verde e seus resíduos de soja, sejam distribuídas de forma uniforme através de um temporizador programável controlando o tempo de abertura e fechamento de cada aleta.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos levantamentos bibliográficos realizados, pode-se verificar a sua importância como base fundamental para o desenvolvimento deste estudo. Tanto as concepções e os princípios do equipamento pesquisado, como a sistemática teórica para o dimensionamento, são fundamentais para que se possa comprovar a eficácia da sua aplicabilidade.

A metodologia aplicada nos materiais e métodos foram a base fundamental para o levantamento de dados para a seleção e o dimensionamento do equipamento de secagem. Principalmente na determinação da densidade, teor de umidade não encontrados nas pesquisas bibliográficas, além da metodologia para o dimensionamento dos parâmetros de secagem.

Quanto ao impacto da armazenagem de vagens verdes, principalmente com altos teores de umidade, conclui-se que é inadequado, podendo danificar o grão vizinho e interfere na qualidade da fabricação do azeite, devido a acidez e coloração escura provocada pela contaminação da vagem verde.

Comprovou-se a viabilidade de investimento num equipamento de secagem da vagem e seus resíduos para a retrilha e reaproveitamento do grão, num processo de secagem em equipamentos pesquisados na referência bibliográfica.

A umidade e a densidade da vagem verde e seus resíduos foram determinadas, com parâmetros compatíveis comparadas a práticas de mercado, confirmando-se também a diferença da densidade e da umidade entre o início e o final da safra.

O dimensionamento do equipamento, conforme resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5, fica evidenciado que ele atende às capacidades para uma demanda de 6 toneladas por hora e uma redução da umidade média relativa de 31% para 18%, de modo a permitir a retrilha da vagem verde, objetivo principal deste estudo.

### 5.1 Trabalhos futuros

Acredita-se que o equipamento e conceito de secagem, apresentado no item 4.4 como sugestões para desenvolvimentos futuros, seja mais eficiente e econômico, inclusive com menos manutenção comparado ao secador rotativo.

Seu princípio de funcionamento exige uma automação para sincronizar seu correto abastecimento e a movimentação do produto, o que pode ser considerado uma desvantagem em relação ao secador rotativo que é de fácil automação.

A necessidade de desenvolver um outro sistema de secagem mais eficaz torna-se imprescindível. Sugere-se um trabalho de continuidade desta tese para desenvolvimento e construção de um equipamento que possa atender:

- A capacidade de secagem de toneladas por hora solicitada pelo mercado;
- A condição de conseguir retirar um grande percentual de umidade conforme mencionado neste estudo de 31 para 18 %, o que não é comum para os equipamentos existentes;
- O transporte/movimentação do produto evitando o embuchamento;
- A eficiência de secagem superior ao secador rotativo;
- Reduzir a manutenção e se possível o investimento inicial nos equipamentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANFAVEA, 2006. Disponível em: <[https://docgo.net/philosophy-of-money.html?utm\\_source=154-pdf](https://docgo.net/philosophy-of-money.html?utm_source=154-pdf)>. Acesso em: 8 março 2018.
- AZADBAKHT, M.; KHOSHTAGHAZA, H. M.; GHOBADIAN, Barat; MINAEI, Saeid: American Journal of Food Science and Technology, v.1, n. 2, 09-2013.
- BERGAMASCHINE, A.F; VALÉRIO FILHO, W. V.; DUARTE, E.F. Degradabilidade *in situ* e digestibilidade *in vivo* dos resíduos de pré-processamento da soja (Glycine Max (L) Merrill). **Revista Ciência e Agro tecnologia**, Lavras, v.23, p. 724-732, jul/set. 1999.
- BIHAIN A.L.J. **Modelagem matemática da influência da umidade do ar, sobre a dinâmica de secagem de grãos de soja em camada fina**. 2011. 138 f. Dissertação de mestrado (Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do estado do RS. – UNIJUI. Ijuí, 2011.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. & HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**, New York, Na AVI BOOK, 1992.
- CENTREINAR, **Curso de Secagem e Aeração de Grãos**: Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2008.
- CONAB 2014. Acompanhamento da safra brasileira – grãos, safra 2013/2014 oitavo levantamento. Maio/2014. Disponível em <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1028&t=2>> Acesso em: 01 dez. 2017.
- CONAB 2017. Acompanhamento da safra brasileira – grãos V.4 Safra 2017/2018 Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safra/gaos>>. Acesso em: 21 out. 2017.
- CONAB 2017. Acompanhamento da safra brasileira – grãos V.4 Safra 2017/2018 Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/soja/2017/39a-ro/app\\_soja\\_39ro\\_conjuntura.pdf](http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/soja/2017/39a-ro/app_soja_39ro_conjuntura.pdf)>. Acesso em: 21 out. 2017.
- COTRIPAL, 2017 : relatório de gestão 2017 - Panambi, RS. Disponível em: <<http://www.cotripal.com.br/balancos>>. Acesso em: 06 mar. 2018.
- DALPASQUALE, V.A.; SPERANDIO, D. Simulação de secagem de milho em altas temperaturas em camadas fixas sob efeito de entalpia constante, usando modelo de Thompson. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa - MG, v.32, p.27-36, 2007.
- DALPASQUALE, V.A.; SPERANDIO, D.; MONKEN E SILVA, L.H. Fixed-bed drying simulation with constant enthalpy, using the improved Michigan State University model. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v.32, n.3, 2009.
- EMBRAPA 2014. Notícias EMBRAPA. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2103371/vagens-e-graos-verdes-interferem-na-qualidade-da-soja-que-chega-a-industria>>. Acesso em: 08 março 2017.

FUKUSHIMA, P.S.; LANFERMARQUEZ, U.M. Chlorophyll derivatives of soybean during maturation and drying conditions. In: international soybean processing and utilization conference, 3., 2000, Tukuba. Proceedings . Tukuba: Korin, 2000. p.87-88.

IGUAZ, A. et al. Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholeseeds by-products in a Rotary dryer. *Journal of Food Engineering*, v. 59, n. 2, p. 151 -160, 2003. ISSN0260-8774. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087740200451X>>. Acesso em: 20 março 2017.

IAPAR 2014. Aproveitamento dos grãos da vagem verde de soja. Londrina, PR Disponível em: [http://eventos.abrapos.org.br/anais/paperfile/110\\_20142111\\_00-29-15\\_118.PDF](http://eventos.abrapos.org.br/anais/paperfile/110_20142111_00-29-15_118.PDF). Acesso em: 06 março 2017.

JOSCIL Equipamento Para Cereais. Disponível em: <<http://www.joscil.com>>. Acesso em: 25 abril 2017.

MANDARINO, J. M. G. Grãos verdes: influencia na qualidade dos produtos à base de soja – série sementes. Londrina – PR: Embrapa Soja, 2012 (Embrapa Soja.Circular Técnica 90).

MELO, E. C.; LOPES, D.C.; CORREA, P. C. GRAPSI . **Programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar**. Engenharia na Agricultura, Viçosa, AEAGRI, v. 12, n. 2, p.154-162, 2004.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; MUNSON, B. R.; DEWITT, D. P. **Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos**. São Paulo: Ed. LTC, 2005. 604 p.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Ed. Universitária/UFPel, 2002.

NILSON, J. F.: **Estudo da fluidodinâmica e da secagem de um secador rotatório da indústria de fertilizantes**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG. 2008.

NBR 11378.: Graos e sementes não moídos – Determinação do teor de umidade. Associação de Normas Técnicas, Rio de Janeiro 1990.

PARK, K. J.; ANTONIO. G. C; OLIVEIRA. R. A; PARK. K. L. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. São Paulo CT&EA, 2007.

PERRY, R.; CHILTON, C.; KIRKPATRICK, S. **Chemical Engineers handbook**. New York MacGraw-Hill, 1999.

PORTELLA, J. A; EICHELBERGER, Luiz. **Secagem de grãos**. Passo Fundo : Embrapa, 2001.

SARTORI, J.A. **Qualidade dos grãos de milho após o processo de secagem**. Campinas: UNICAMP, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001

SCIARAPPA, W. J. (2005). Edamame: the vegetable soybean. Fact sheet, Rutgers cooperative extension. Disponível em: <http://www.rce.rutgers.edu/pubs/pdfs/fso41.pdf#search='vegetable%20soybean%20Japan'>. Acesso em: 06 março 2017.

SILVA, M. et al. Modelling of fertilizer drying in a Rotary dryer: parametric sensitivity analysis. Brazilian Journal of Chemical Engineering, SciELO Brasil, v.29, n.2 p 359-369, 2012.

SILVA, S. J.; PAULO, C. C.; LOPES, P. L.; REZENDE, R. C.: **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, Aprenda Fácil, 2000.

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

SILVA, J.S.; BERBERT, P. A. **Colheita, secagem e armazenamentos de café**. Viçosa: Ed. Aprenda fácil, 1999.

SIRISOMBOON, P.; PORNCHALOEMPONG, P.; ROMPHOPHAK, T. Physical properties of green soybean: Criteria for sorting. **ScienceDirect**, Janeiro 2006.

TRINDADE, M. **Secagem de soja em camada espessa: Modelagem matemática e simulação numérica**. 2013. 102 f. Dissertação de mestrado (Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do estado do RS. – UNIJUI, Ijuí.2013.

VECCHIO, E. C.; LORINI, I.: Estudo comparativo do custo x benefício de trilhar vagens de soja durante o recebimento de grãos na unidade armazenadora. Revista Paraná Cooperativo, edição especial técnico científico num. 128 ed. 11, 2015.

Weber, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Canoas: Ed. Salles, 2005.

WIEBOLD, B. **Soybean plants killed before maturity possess grain that remains green**. Disponível em: <<http://www.psu.missouri.edu/soyx/green.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2012.