

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MAIARI SCHEIBEL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA TERMOHIGROMÉTRICA DO AR NO TEMPO DE
SECAGEM DE GRÃOS**

PONTA GROSSA

2022

MAIARI SCHEIBEL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA TERMOHIGROMÉTRICA DO AR NO TEMPO DE
SECAGEM DE GRÃOS**

Study of thermohygrometric influence of air on drying time of grains

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Me. Eng. Tárik Linhares Tebchirani

PONTA GROSSA

2022



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MAIARI SCHEIBEL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA TERMOHIGROMÉTRICA DO AR NO TEMPO DE
SECAGEM DE GRÃOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01/julho/2022

Tárik Linhares Tebchirani
Mestrado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Antonini Alves
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gilberto Zammar
Doutorado em Engenharia de Produção
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2022

Dedico este trabalho à minha avó Ruth (*in
memorian*), por todo o carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida, e por sempre iluminar meu caminho;

Ao meu pai, Orlando, por todo amor, incentivo, por tudo que fez e faz por mim, pela paciência em me explicar tudo que sabe sobre secagem de grãos;

A minha mãe, Márcia, por todo cuidado, amor e incentivo;

Ao meu orientador, Prof. Me. Eng. Tárík Linhares Tebchirani, por todos os ensinamentos, pelas oportunidades concedidas, e, sobretudo, pela orientação nesse trabalho;

Ao meu namorado, por todo apoio desde o início da graduação, e, principalmente, durante a realização desse trabalho;

Aos professores da banca, por todos os ensinamentos ao longo do curso e, principalmente, por se disponibilizarem a avaliar esse trabalho;

Aos engenheiros agrônomos Paulo Veiga e João Everaldo Prestes de Oliveira, por me auxiliarem a entender os processos biológicos que ocorrem com os grãos;

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo excelente ambiente de ensino;

Aos amigos que fiz durante essa jornada.

Enfim, a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará a seu tamanho original.”
Albert Einstein

RESUMO

A economia brasileira é movida pela produção agrícola, fazendo com que o país seja o maior exportador de grãos do mundo. Com isso, as exigências de qualidade do mercado internacional se fazem cada vez mais presentes, fomentando tecnologias em produção e beneficiamento dos grãos. Dessa forma, surge a necessidade de processos de secagem de grãos cada vez mais rápidos e que promovam menos danificação ao produto. Com essas circunstâncias, o presente Trabalho de Conclusão de Curso analisou, de forma teórica, a influência das propriedades do ar de secagem no tempo de processo de secagem de grãos de milho, soja, arroz e trigo. Os cálculos basearam-se no método de Thompson, para um secador de leito fixo, comumente aplicado em pequenas e médias propriedades rurais. Os resultados demonstram que, com o aumento da temperatura do ar de secagem, há redução no tempo de processo. Ao analisar a redução de umidade relativa do ar, os resultados mostraram-se mais expressivos em temperaturas mais baixas. Os grãos de soja, devido à sua composição majoritariamente hidrofóbica, sofrem intensa desidratação quando expostos ao ar de secagem com umidade relativa igual ou inferior a 40%, deixando de atender aos requisitos de qualidade comercial. Foram construídas as isotermas de dessorção para todos os grãos estudados, apresentando o comportamento esperado e validando a metodologia de cálculo. De forma geral, a redução de umidade relativa do ar promove redução do tempo de secagem, além de, fornecer a possibilidade de realizar o processo em temperaturas mais baixas.

Palavras-chave: secagem de grãos; temperatura; umidade; tempo; método de Thompson.

ABSTRACT

The Brazilian economy is driven by agricultural production, making the country the largest grain exporter in the world. As a result, the quality requirements of the international market are increasingly present days, fostering technologies in grain production and processing. Thus, there is a need for faster grain drying processes that promote less damage to the product. With these circumstances, the present Final Paper theoretically analyzed the influence of drying air properties on the drying process time of corn, soybean, rice and wheat grains. The calculations were based on Thompson's method for a fixed bed dryer, commonly applied in small and medium-sized rural properties. The results demonstrate that, with the increase of the drying air temperature, there is a reduction in the process time. When analyzing the reduction of relative humidity of the air, the results were more expressive in lower temperatures. Soybean grains, due to their mostly hydrophobic composition, suffer intense dehydration when exposed to drying air with relative humidity equal to or less than 40%, failing to meet commercial quality requirements. The desorption isotherms were constructed for all the studied grains, presenting the expected behavior and validating the calculation methodology. In general, the reduction of relative humidity promotes a reduction in drying time, in addition to providing the possibility of carrying out the process at lower temperatures.

Keywords: drying of grains; temperature; humidity; time; Thompson's method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Reações de deterioração e atividade de água dos produtos	21
Figura 2 – Isotermas de sorção.....	22
Figura 3 – Esquema de um diagrama psicrométrico	28
Figura 4 - Secador de leito fixo	32
Figura 5 - Esquema de secagem em camada delgada de acordo com o método do Thompson.....	33
Figura 6 - Interface do programa GRAPSI 5.1	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Dados de secagem de milho com umidade relativa do ar de 60%	39
Gráfico 2 - Dados de secagem de milho com umidade relativa do ar de 40% ...	40
Gráfico 3 - Dados de secagem de milho com umidade relativa do ar de 20% ...	41
Gráfico 4 – Milho: secagem a 60°C com variação da umidade relativa do ar. ...	42
Gráfico 5 – Milho: secagem a 75°C com variação da umidade relativa do ar. ...	42
Gráfico 6 – Milho: secagem a 90°C com variação da umidade relativa do ar. ...	43
Gráfico 7 – Dados de secagem de soja com umidade relativa do ar de 60%.....	44
Gráfico 8 – Dados de secagem de soja com 40% de umidade relativa do ar.....	45
Gráfico 9 - Soja: secagem a 60°C com variação da umidade relativa do ar	46
Gráfico 10 - Soja: secagem a 75°C com variação da umidade relativa do ar	47
Gráfico 11 - Soja: secagem a 90°C com variação da umidade relativa do ar	47
Gráfico 12 - Dados de secagem do arroz com umidade relativa do ar em 60%.	49
Gráfico 13 - Dados de secagem do arroz com umidade relativa do ar de 40%..	50
Gráfico 14 - Dados de secagem do arroz com umidade relativa do ar de 20%..	51
Gráfico 15 – Arroz: secagem a 60°C com variação da umidade relativa do ar. .	51
Gráfico 16 – Arroz: secagem a 75°C com variação da umidade relativa do ar. .	52
Gráfico 17 – Arroz: secagem a 90°C com variação da umidade relativa do ar. .	53
Gráfico 18 - Dados de secagem de trigo com umidade relativa do ar de 60%...	54
Gráfico 19 - Dados de secagem de trigo com umidade relativa do ar de 40%...	56
Gráfico 20 - Dados de secagem de trigo com umidade relativa do ar de 20%...	57
Gráfico 21 – Trigo: secagem a 60°C com variação na umidade relativa do ar...	58
Gráfico 22 – Trigo: secagem a 70°C com variação de umidade relativa do ar...	59
Gráfico 23 – Trigo: secagem a 80°C com variação da umidade relativa do ar...	60
Gráfico 24 - Isoterma de dessorção do milho.....	61
Gráfico 25 - Isoterma de dessorção da soja.	61
Gráfico 26 - Isoterma de dessorção do arroz.....	62
Gráfico 27 - Isoterma de dessorção do trigo.	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Massa específica global de alguns grãos	24
Quadro 2 - Equações para cálculo das constantes A e B.....	35
Quadro 3 - Equações para cálculo da umidade de equilíbrio.....	35
Quadro 4 - Equações para cálculo do calor específico	35
Quadro 5 - Dimensões do secador	37

Quadro 6 - Propriedades do ar úmido com 60% de umidade relativa	37
Quadro 7 – Propriedades do ar úmido com 40% de umidade relativa	38
Quadro 8 - Propriedades do ar úmido com 20% de umidade relativa	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de porosidade para alguns grãos	23
Tabela 2 - Ângulo de repouso dos grãos	25
Tabela 3 – Dados de cálculo para secagem de milho com umidade relativa do ar de 60%.....	39
Tabela 4 – Dados de cálculo para secagem de milho com umidade relativa do ar de 40%.....	40
Tabela 5 – Dados de cálculo para secagem de milho com umidade relativa do ar de 20%.....	41
Tabela 6 – Dados de cálculo para secagem de soja com umidade relativa do ar de 60%.....	44
Tabela 7 – Dados de cálculo para secagem de soja com umidade relativa do ar de 40%.....	45
Tabela 8 – Dados de cálculo para secagem de arroz com umidade relativa do ar de 60%.....	48
Tabela 9 – Dados de cálculo para secagem de arroz com umidade relativa do ar de 40%.....	49
Tabela 10 – Dados de cálculo para secagem de arroz com umidade relativa do ar de 20%.....	50
Tabela 11 – Dados de cálculo para secagem de trigo com umidade relativa do ar de 60%.....	54
Tabela 12 – Dados de cálculo para secagem de trigo com umidade relativa do ar de 40%.....	55
Tabela 13 – Dados de cálculo para secagem de trigo com umidade relativa do ar de 20%.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Delimitação do problema	17
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo Geral.....	17
1.3.2	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Propriedades dos grãos	19
2.1.1	Absorção de água	19
2.1.2	Equilíbrio higroscópico	21
2.1.3	Porosidade dos grãos.....	23
2.1.4	Condutividade Térmica.....	23
2.1.5	Massa específica global	24
2.1.6	Ângulo de repouso	24
2.2	Propriedades do ar úmido	25
2.2.1	Umidade Absoluta	25
2.2.2	Umidade Relativa	26
2.2.3	Grau de saturação.....	26
2.2.4	Volume específico	26
2.2.5	Calor específico a pressão constante.....	27
2.2.6	Temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido	27
2.3	Secagem de grãos	28
2.3.1	Classificação dos secadores	29
2.3.2	Parâmetros de secagem	30
3	DESENVOLVIMENTO	32
3.1	Secadores de leito fixo	32
3.2	Método de Thompson para secagem em leito fixo	33
3.3	Softwares utilizados	36
4	RESULTADOS	37
4.1	Secagem de milho	38
4.2	Secagem de soja	43
4.3	Secagem de arroz	48
4.4	Secagem de trigo	53

4.5	Isotermas de sorção.....	60
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
5.1	Conclusões	64
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A conservação de cereais é uma preocupação constante da humanidade, visto que sua produção é sazonal, e, seu consumo, como fonte de alimentação humana e animal, é permanente. Há ainda a preocupação em armazená-los, conservando suas características fisiológicas, pois são necessários como sementes, para originar novos plantios. Porém, como são produtos perecíveis, os cereais estão sujeitos a perdas de qualidade, devido à agentes externos, se armazenados de forma incorreta. Dessa forma, o homem vem se aprimorando, tanto em técnicas de plantio e melhoria de sementes, como em técnicas mais eficientes e seguras de secagem e armazenagem (Costa, 2007).

Segundo historiadores, a agricultura surgiu há 10000 anos, sendo esse o acontecimento mais importante na história do homem. Tal fato assegurou alimentação a um número muito maior de pessoas do que o sistema de caça e coleta era capaz de fornecer. De acordo com a literatura, antes da agricultura, era possível alimentar no máximo uma população mundial de 30 milhões de pessoas (Carvalho, 2005).

Pode-se dizer que um dos grandes saltos na agricultura ocorreu no antigo Egito e Mesopotâmia, atual Oriente Médio. Os contribuintes para o desenvolvimento foram a alta fertilidade do solo, aliada à proximidade de água, assim como a topografia favorável, e, principalmente, as baixas umidades relativas do ar naquela região. Como a região é caracterizada por baixos índices pluviométricos e clima praticamente desértico, a baixa umidade do ar determinava baixo teor de água de equilíbrio nos cereais durante a colheita, sendo preservado durante o armazenamento, conferindo grãos e sementes de boa qualidade fisiológica para os plantios seguintes (Carvalho, 2005).

Conforme a agricultura foi se difundindo para o resto do globo, nem sempre existiram condições adequadas à secagem natural dos grãos. Assim, o homem se viu perante à necessidade de encontrar uma forma artificial de realizar a secagem. De acordo com Foster, em 1870 os Estados Unidos já contavam com secadores artificiais, restritos à grandes empresas da época. O uso dos secadores foi se intensificando com as Guerras Mundiais, uma vez que houve redução na população rural, ao mesmo tempo em que houve acréscimo na demanda de alimentos (Carvalho, 2005).

No período entre guerras, ocorreu o aperfeiçoamento de técnicas agrícolas, com o surgimento dos híbridos, e, com o estudo acerca da maturação fisiológica das sementes, o que adiantou o ponto de colheita, sendo realizado quando os cereais apresentavam teor de água entre 30 e 50%. O desenvolvimento da engenharia mecânica, com o conceito de climatização de ambientes e da psicrometria, fez-se essencial também para os estudos e consequente evolução da secagem artificial de grãos. No ano de 1947, as fortes chuvas durante a colheita do milho no “Corn Belt”, nos Estados Unidos, foram responsáveis por mudanças nos métodos de secagem, convencendo os agricultores a adotarem sistemas de secagem artificial, assim como a colher o milho debulhado (Carvalho, 2005).

Os primeiros secadores a serem criados, segundo Foster, eram do tipo contínuo. Conforme foram se difundindo para as propriedades agrícolas, passou-se a adotar o modelo estacionário, onde as sementes eram secas e armazenadas no mesmo local. Em seguida, surgiram os secadores estacionários portáteis, para atender a demanda de pequenos produtores, e, também, os contínuos portáteis, para que a secagem se iniciasse no campo. Com o crescimento da industrialização, a energia tornou-se mais cara, e, então, secadores mais eficientes foram desenvolvidos, como os secadores intermitentes e os secadores por refrigeração. A secagem de grãos no Brasil é basicamente restrita ao uso de tecnologias desenvolvidas no exterior, com poucos projetos voltados a secadores estacionários e com uso de energia solar para pequenas propriedades (Carvalho, 2005; Costa, 2007).

O processo de secagem de grãos deve ser realizado com certa precaução, uma vez que pode danificar o produto, comprometendo seriamente a qualidade dos grãos processados. Tais danos podem ser mecânicos, quando se faz com que os grãos circulem muitas vezes pelo interior do secador, causados por impacto e abrasão, e, também, fisiológicos, sendo esses decorrentes do processo de secagem, relacionados principalmente com a temperatura e umidade durante o processamento. Nesse sentido, é de suma importância empregar uma abordagem psicrométrica ao ar utilizado no processo, de modo a controlar e analisar suas propriedades, garantindo a integridade fisiológica dos grãos (Carvalho, 2005).

Além dos danos decorrentes do processo de secagem, a ausência de um procedimento de limpeza dos grãos e o ataque de pragas podem causar prejuízos imensuráveis ao produtor. Grãos condicionados em armazéns, silos e secadores,

sem a limpeza adequada, geram poeira em suspensão, criando uma atmosfera explosiva. Essa poeira, se aquecida e/ou agitada, acaba explodindo, gerando vibrações, que irão agitar mais poeira, e mais explosões irão ocorrer. Salvo os processos de limpeza de grãos e armazenagem, o uso de atmosfera controlada pode auxiliar no controle preventivo de explosões. Atmosferas com insuflação de gás inerte, como dióxido de carbono e nitrogênio, reduzem a concentração de oxigênio gasoso, substância responsável pela ignição da explosão. Outro parâmetro de grande importância para a prevenção das explosões é o controle de umidade dos grãos. Grãos muito úmidos entrarão em decomposição, liberando substâncias altamente inflamáveis, como metanol, propanol, butanol, metano e etano.

O controle de pragas por expurgos é outro fator que pode acarretar riscos de explosão, assim como de letalidade para os operadores. O produto mais comumente empregado durante a fumigação é a fosfina (proveniente de fosfeto de alumínio ou de magnésio), um gás incolor, altamente tóxico e biocida geral, sendo eficaz no controle de pragas em todas as fases (ovo, larva, pupa, adultos). A fosfina, por ser um produto altamente inflamável, exige um ambiente de atmosfera controlada ao ser manipulada, uma vez que pode inflamar e até mesmo explodir em contato com oxigênio e umidade (Lorini, 2015).

Do mesmo modo, para assegurar a qualidade dos grãos durante a armazenagem, o conhecimento das propriedades psicrométricas faz-se extremamente necessário. A temperatura e umidade do ar e dos grãos são fatores determinantes em se tratar da ocorrência de fungos e insetos. De acordo com estudos, a grande maioria das espécies reduz sua atividade biológica a temperaturas inferiores a 15°C, e, em baixos teores de umidade dos grãos. Promover a aeração dos grãos é também um fator determinante para mantê-los livres de pragas. Se não há aeração, a umidade migra de um ponto a outro, provocando correntes de convecção de ar, o que, por sua vez, cria pontos de alta umidade relativa e alto teor de umidade do grão, criando condições favoráveis para o desenvolvimento fúngico. Assim, grãos de temperatura e umidade aqueda e uniformemente distribuída, são capazes de manter sua integridade fisiológica por longos períodos de tempo (Carvalho, 2015; Costa, 2007; Lorini, 2015).

1.1 Delimitação do problema

De acordo com a Embrapa, o Brasil é o quarto colocado no ranking mundial de produção de grãos, sendo o maior exportador, detendo 22,2% das exportações globais. Por esse motivo, uma das principais preocupações agrícolas é atender as exigências de qualidade do mercado internacional, buscando melhoria nos processos de colheita e beneficiamento. Deficiências no processo de secagem resultam em grãos com integridade comprometida, devido ao excesso de temperatura ou de umidade, contribuindo também para o desenvolvimento de fungos e consequente liberação de toxinas, sendo esse o problema mais sério de segurança alimentar do mundo.

Para Ferrari Filho (2011), a temperatura de secagem dos grãos e o tempo de processo tem se tornado foco de pesquisadores, devido a alterações na integridade dos grãos, em decorrência do processo de secagem em altas temperaturas. Segundo estudos, os grãos de milho, quando secos com ar aquecido acima de 90°C, apresentam perdas em seu valor energético, além da perda de palatabilidade e das alterações químicas no endosperma, comprometendo seu uso como semente.

1.2 Justificativa

Segundo Tolentino (2018), o processo de secagem a altas temperaturas pode representar cerca de 65% do consumo de energia de produção de grãos, além de oferecer risco à integridade fisiológica do produto. Dessa forma, a busca por processos mais seguros e mais econômicos tem fomentado o desenvolvimento de novas tecnologias. Portanto, o presente Trabalho de Conclusão de Curso busca, de forma teórica, uma alternativa para reduzir o tempo de secagem de produtos agrícolas, reduzindo o consumo de energia e garantindo um produto final de maior qualidade.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho de conclusão de curso tem, por objetivo geral, analisar, de forma teórica, a influência das propriedades termohigrométricas do ar no tempo de secagem de diferentes grãos.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- a. Simular, de forma matemática, o tempo de secagem de diferentes grãos, sob diferentes condições de temperatura e umidade do ar de secagem;
- b. Analisar quais propriedades termohigrométricas influenciam de forma mais significativa o tempo de processo;
- c. Construir isotermas de sorção para os grãos, e compará-las com dados experimentais;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, têm-se uma breve contextualização acerca dos temas abordados no presente estudo, trazendo definições relevantes para o entendimento das atividades realizadas.

2.1 Propriedades dos grãos

Para assegurar a segurança alimentar de sua população, um país necessita armazenar sua produção agrícola, de forma a assegurar a mantabilidade da qualidade dos grãos. Dessa forma, sua comercialização ocorre com menor depreciação de mercado (Neto et al., 2014).

Visando preservar a integridade fisiológica dos grãos durante o processamento, é de suma importância compreender a relação entre o teor de água do grão e a umidade relativa do ar, a uma dada temperatura. Os grãos apresentam higroscopicidade, ou seja, cedem e/ou absorvem água do ambiente onde se encontram, o que faz com que tendam ao equilíbrio com as condições do ar ambiente (Neto et al., 2014).

O conhecimento acerca das demais propriedades dos grãos contribui para o constante estudo e aperfeiçoamento dos processos de pós-colheita, facilitando os cálculos relacionados à transferência de calor e massa, prevendo, assim, o limite de secagem, obtendo grãos capazes de ser armazenados por longos períodos de tempo, sem perder sua qualidade (Zeymer, 2021; Neto et al., 2014). Na sequência, segue definições pertinentes sobre as principais propriedades dos grãos.

2.1.1 Absorção de água

Os grãos são constituídos por macromoléculas orgânicas (carboidratos, lipídeos e proteínas), água, minerais e vitaminas. A composição dos grãos atua diretamente na forma e força com que a água incorpora-se à estrutura (Dias, 2015; Torres, 2006). Em suma, a água nos grãos pode ser encontrada em quatro formas distintas (Torres, 2006):

- a. *água de constituição*: camada monomolecular de água, ligada a grupamentos constituintes das substâncias de reserva do grão;
- b. *água absorvida*: camada polimolecular fixa sobre a água de constituição, ligada à matéria de forma eletromagnética;

- c. *água adsorvida/sob tensão osmótica*: água solvente, agindo como mediadora das reações químicas e como forma de transporte de nutrientes;
- d. *água livre*: água de impregnação, que se aloca nos espaços intergranulares da estrutura do grão. Sua presença torna o grão inapto para conservação, uma vez que é responsável pela proliferação de fungos e apodrecimento dos grãos.

Em geral, a água de constituição e a água absorvida representam níveis de hidratação baixos nos grãos, entre 5 a 13%. A água adsorvida corresponde a níveis de hidratação entre 13 e 27%, e, a água livre corresponde a níveis superiores a 27% (Dias, 2015).

O conhecimento do teor de água de um grão tem grande importância para estimar o tempo de armazenamento de um produto, assim como para comercializá-lo, evitando prejuízos por parte do comprador, por produto com excesso de água. O teor de água pode ser calculado em base úmida e base seca; o teor de água em base úmida é utilizado no processamento e comercialização dos produtos, enquanto que, o teor de água em base seca é empregado em pesquisas e estudos da cinética de secagem dos grãos (Sousa, 2017). Os cálculos para obter o teor de água são dados por:

$$u_{bu} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{total}}} 100 = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{água}} + m_{\text{grão}}} 100 \quad (1)$$

$$u_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{grão}}} \quad (2)$$

Onde $m_{\text{água}}$ é a massa de água do produto, em kg; $m_{\text{grão}}$ é a massa dos grãos, em kg; m_{total} é a massa total do produto, em kg.

As conversões entre teor de água em base seca e base úmida são expressas pelas seguintes equações:

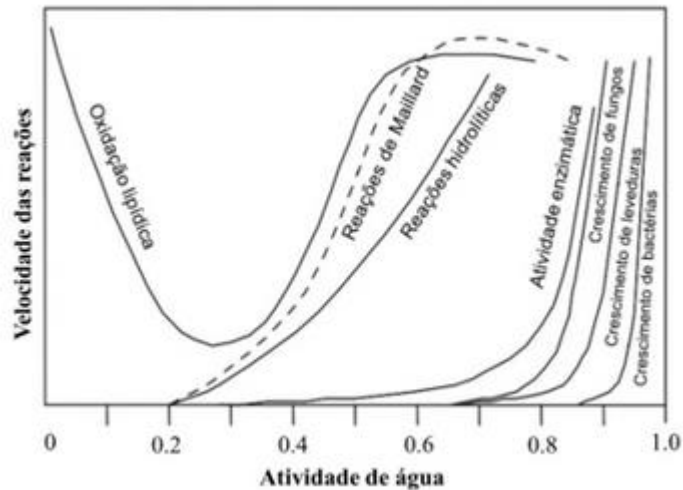
$$u_{bu} = \frac{u_{bs}}{100 + u_{bs}} 100 \quad (3)$$

$$u_{bs} = \frac{u_{bu}}{100 - u_{bu}} \quad (4)$$

O teor de água de um grão não pode ser considerado um indicativo de sua estabilidade, uma vez que a água de constituição é menos suscetível a participar das reações de deterioração. Desse modo, surge o parâmetro conhecido como atividade de água, relacionando a quantidade real de água disponível com as taxas

de crescimento microbiano, reações de deterioração e demais reações enzimáticas (Zeymer, 2021). A Figura 1 apresenta as principais reações de deterioração e sua relação com a atividade de água dos grãos.

Figura 1 – Reações de deterioração e atividade de água dos produtos



Fonte: Zeymer (2021)

A atividade de água é definida como a razão entre a pressão de vapor do produto e a pressão de saturação do vapor de água na mesma temperatura, conforme a equação abaixo:

$$W_A = p_v / p_s \quad (5)$$

Onde W_A é a atividade de água, p_v é a pressão de vapor do produto, a uma dada temperatura, e, p_s é a pressão de saturação do vapor de água à mesma dada temperatura (Costa, 2007).

Quando W_A é igual a um, assume-se que a água contida no produto encontra-se não ligada (água livre), e que sua atividade de água corresponde a 100%. Quando W_A é inferior a um, admite-se que a água é ligada (água de constituição). Para uma armazenagem segura dos grãos, é recomendado que a atividade de água esteja abaixo de 0,70 (Costa, 2007).

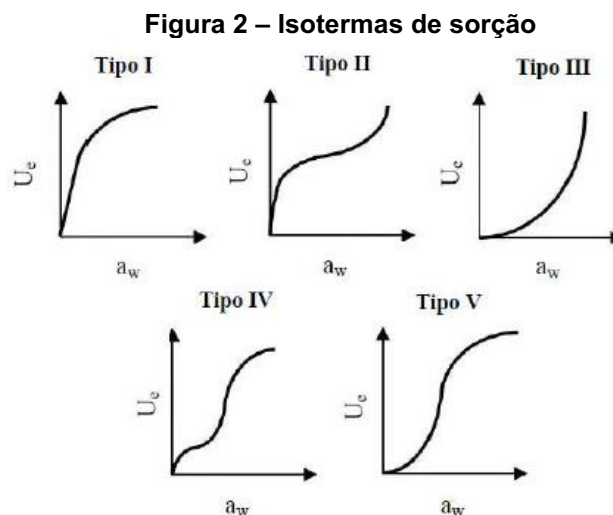
2.1.2 Equilíbrio higroscópico

A higroscopicidade dos grãos refere-se à sua capacidade de trocar água com o meio circundante, buscando manter uma relação de equilíbrio entre seu teor de água e as condições do meio. A higroscopicidade possui relação direta com a

composição dos grãos: grãos com predominância de substâncias polares (proteínas e carboidratos) são hidrofílicos, enquanto grãos com predominância de lipídeos são hidrofóbicos; dessa forma, quanto maior a polaridade de uma molécula, maior será sua higroscopicidade (Zeymer, 2021).

A higroscopicidade dos grãos se relaciona com a pressão de vapor da água contida na superfície dos grãos e da pressão de vapor da água no ar que os envolve: quando, $p_{vapor,grão}$ é igual a $p_{vapor,ar}$, ocorre o equilíbrio higroscópico, onde o grão não perde nem absorve água; se, $p_{vapor,grão}$ for maior que $p_{vapor,ar}$, acontece o processo de secagem, onde o grão sofre dessorção; e, se $p_{vapor,grão}$ for menor que $p_{vapor,ar}$, o grão umedece, recebendo água do ar ambiente. A secagem termina quando a pressão de vapor da água no interior do grão se iguala a pressão de vapor da água do ar de secagem, ocorrendo o teor de umidade de equilíbrio (Sousa, 2017; Zeymer, 2021).

O teor de água de equilíbrio do grão pode ser relacionado com a umidade relativa do ar ou com a atividade de água do grão, dando origem a curva isotérmica de sorção (Sousa, 2017). Existem cinco tipos de isoterma de sorção, de acordo com a capacidade de absorção dos poros do material. A Figura 2 ilustra os cinco tipos de isotermas:



Fonte: Zeymer (2021)

As isotermas mais comumente encontrada em produtos alimentícios são do tipo II e III, sendo a tipo II comum para produtos solúveis, e, a tipo III (isoterma de Flory-Higgins) é encontrada em solventes com teor de material cristalino (Zeymer,

2021). As curvas podem ser construídas a partir do processo de umedecimento dos grãos (isoterma de adsorção) ou de secagem (isoterma de dessorção) (Sousa, 2017).

2.1.3 Porosidade dos grãos

A porosidade dos grãos pode ser entendida como a relação do volume de ar na massa de grãos e o volume total ocupado pelos grãos (Tunnermann, 2018). A porosidade dos grãos apresenta valores entre 30 a 50%, conforme a espécie, teor de umidade e quantidade de grãos quebrados (Dias, 2015).

Quanto maiores os grãos, menor será a porosidade; em contrapartida, os espaços intergranulares serão maiores, facilitando o escoamento de ar durante a secagem. E, para grãos pequenos ou quebrados, a porosidade é maior, com espaços intergranulares muito pequenos, dificultando o escoamento de ar (Dias, 2015).

A Tabela 1 mostra dados da literatura para diferentes grãos e seus respectivos valores de porosidade:

Tabela 1 – Dados de porosidade para alguns grãos

Grão	Teor de umidade em base seca	Porosidade
Arroz	14,2	46,5
Milho	9,9	40,0
Trigo	10,9	40,1
Soja	7,4	36,1

Fonte: Dias (2015), adaptado

2.1.4 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma propriedade dos materiais, que mede a taxa de fluxo de calor que atravessa o material, sob influência de um gradiente de temperatura. Quanto maior a condutividade térmica, mais condutor será o material, ou seja, mais calor irá atravessá-lo. Materiais de baixa condutividade térmica são chamados de isolantes (Dias, 2015).

Os grãos têm influência direta de seu teor de umidade em sua condutividade térmica, quanto mais úmido, maior será sua condutividade térmica. Em geral, são considerados isolantes, por apresentam baixos valores de condutividade. Esse fato faz com que focos de aquecimento no interior da massa passem despercebidos, não

ocorrendo intervenção a tempo, de modo que os grãos perdem sua qualidade (Dias, 2015).

2.1.5 Massa específica global

A massa específica global dos grãos é dada pela razão entre o peso da massa de grãos e o volume ocupado pela mesma, incluindo os espaços vazios. É uma propriedade específica para cada espécie de grão, variando também conforme o teor de umidade. A massa específica global é utilizada para determinar a capacidade de silos, e, pode aumentar em uma coluna de grãos devido à compressão das camadas inferiores pelas superiores (Dias, 2015).

Abaixo, o Quadro 1 demonstra a variação da massa específica global em função do teor de umidade, para algumas espécies de grãos.

Quadro 1 - Massa específica global de alguns grãos

Grão	Teor de umidade (% base úmida)	Massa específica global (kg/m ³)
Arroz	12	586
	14	588
	16	605
Milho	7,3	753
	13	737
	16,2	721
Trigo	7,3	790
	11	790
	14,1	756

Fonte: Dias (2015)

2.1.6 Ângulo de repouso

Consiste no ângulo máximo entre o material amontoado e o plano horizontal. Ocorre devido ao coeficiente de fricção entre os grãos, podendo ser estático ou dinâmico. O ângulo estático é o ângulo de fricção dos grãos quando deslizam sobre eles mesmos; o ângulo dinâmico ocorre durante o movimento da massa de grãos, como em descargas de silos (Dias, 2015).

O ângulo de repouso sofre variação com os seguintes parâmetros:

- a. Para grãos esféricos, menor será o ângulo;
- b. Para grãos grandes, menor será o ângulo;
- c. Para grãos rugosos, maior será o ângulo;
- d. Para maiores teores de umidade, maior será o ângulo.

A Tabela 2 fornece o valor do ângulo de repouso de algumas espécies de grãos.

Tabela 2 - Ângulo de repouso dos grãos

Grão	Ângulo de repouso (graus)
Arroz com casca	36
Milho	27
Soja	30
Trigo	35
Feijão	31

Fonte: Dias (2015)

2.2 Propriedades do ar úmido

A psicrometria pode ser entendida como um ramo da física responsável por determinar as condições do ar atmosférico, especialmente em se tratar da mistura ar seco – vapor d'água. Pode ser definida também como a parte da ciência que estuda as propriedades termodinâmicas do ar úmido, priorizando as necessidades humanas, ambientais e tecnológicas (Oliveira, 2003).

2.2.1 Umidade Absoluta

A umidade absoluta (ω) é definida como a razão entre as massas de vapor de água e de ar seco presentes na mistura, em kg.

$$\omega = \frac{m_{vapor}}{m_{ar}} \quad (6)$$

Ao considerar o ar como uma mistura de dois gases perfeitos, e, considerando a lei de mistura de Dalton, obtém-se:

$$m_{ar} = \frac{P_{ar}V}{R_{ar}T} \text{ e } m_{vapor} = \frac{P_{vapor}V}{R_{vapor}T} \quad (7)$$

onde V é o volume da mistura, T é a temperatura da mistura e R são as constantes particulares do gases, e, P_i suas pressões parciais. Ao substituir em I,

$$\omega = \frac{R_{ar} P_{vapor}}{R_{vapor} P_{ar}} \quad (8)$$

sabendo que a razão entre as constantes particulares dos gases equivale a razão de suas massas molares, e, que, as massas molares do vapor e do ar seco valem $M_{vapor} = 18,01534$ e $M_{ar} = 28,9645$, têm-se que

$$\omega = 0,62198 \left(\frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} \right) \quad (9)$$

onde P é a pressão total da mistura (Simões-Moreira; Neto, 2019).

2.2.2 Umidade Relativa

É entendida como a razão entre a fração molar do vapor de água presente na mistura, e , a fração molar que o vapor de água teria se a mistura estivesse saturada, nas mesmas condições de temperatura e pressão.

$$\Phi = \frac{x_{vapor}}{x_{vapor\ saturated}} \quad (10)$$

Considerando a equação dos gases perfeitos, e a definição de fração molar, a expressão pode ser substituída por:

$$\Phi = \frac{n_{vapor}}{n_{vapor\ saturated}} = \frac{P_{vapor}}{P_{vapor\ saturated}} \quad (11)$$

onde n_i é o número de mols. A umidade relativa varia entre 0 e 1, portanto, seu valor é fornecido em porcentagem (Simões-Moreira; Neto, 2019).

2.2.3 Grau de saturação

De acordo com Simões-Moreira e Neto (2019), grau de saturação é a razão entre a umidade absoluta do ar e a umidade absoluta do ar saturado, em pressão e temperatura de mistura constantes.

$$\mu = \omega/\omega_s \quad (12)$$

2.2.4 Volume específico

O volume específico relativo à massa de ar seco é obtido pela razão entre o volume ocupado pela mistura e a massa de ar seco presente (Simões-Moreira; Neto, 2019).

$$v_{ar} = V/m_{ar} \quad (13)$$

Ao utilizar a simplificação de gases perfeitos, e a simplificação de $R_{ar} = \mathfrak{R}/M_{ar}$, têm-se:

$$v = 0,2870 \left(\frac{T}{P} - P_v \right) \quad (14)$$

2.2.5 Entalpia e Entalpia Específica

A entalpia total da mistura, H , é dada pela soma das entalpias de cada componente da mistura (Simões-Moreira; Neto, 2019). Logo,

$$H = H_{ar} + H_{vapor} \quad (15)$$

A entalpia específica da mistura, h , é a razão entre a entalpia total e a massa de ar seco, ou também,

$$h = \frac{H}{m_{ar}} = \frac{m_{ar} h_{ar}}{m_{ar}} = \frac{m_{vapor} h_{vapor}}{m_{ar}} \quad (16)$$

2.2.5 Calor específico a pressão constante

O calor específico a pressão constante, referente à massa de ar seco, é obtido pela combinação dos calores específicos do ar seco e do vapor de água (Simões-Moreira; Neto, 2019). Sendo assim

$$c_p = c_{p\ ar} + \omega c_{p\ vapor} \quad (17)$$

2.2.6 Temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido

A temperatura de bulbo seco, ou TBS, é a temperatura da mistura, indicada por um termômetro comum.

A temperatura de bulbo úmido corresponde à temperatura medida por um termômetro de bulbo úmido, que nada mais é do que um termômetro com o bulbo envolvido por uma mecha de material higroscópico embebido em água destilada. Quando uma corrente de ar entra em contato com a mecha umedecida, ocorre transferência de calor entre os meios. Ao estabelecer-se o regime permanente, o termômetro indicará a temperatura de equilíbrio, ou seja, a temperatura de bulbo úmido, ou TBU (Simões-Moreira; Neto, 2019; Carvalho, 2016).

Têm-se também a temperatura de bulbo úmido termodinâmica, a qual acontece devido à uma condição de equilíbrio termodinâmico, através do processo de saturação adiabática, sendo assim, uma propriedade termodinâmica do ar (Simões-Moreira; Neto, 2019).

2.2.8 Temperatura do ponto de orvalho

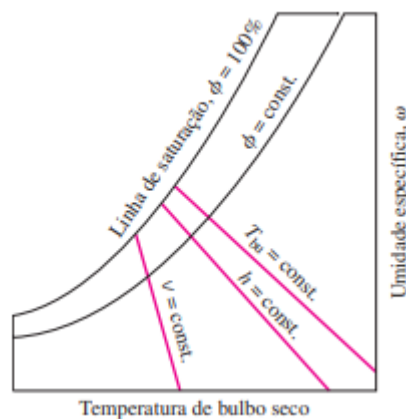
A temperatura do ponto de orvalho, T_o , corresponde à temperatura do ponto de início da condensação do vapor de água presente no ar úmido, a pressão

constante. a temperatura do ponto de orvalho pode ser entendida também como a temperatura de saturação, que corresponde à pressão parcial do vapor na mistura (Simões-Moreira; Neto, 2019).

2.2.9 Cartas Psicrométricas

Hertz, Mueller, Carrier e Mollier foram os pioneiros a agrupar as propriedades psicrométricas em diagramas, as cartas psicrométricas. Esses diagramas facilitam a resolução de diversos problemas referentes à mistura de ar e vapor d'água, uma vez que permitem a análise gráfica de dados e processos psicrométricos (Carvalho, 2016). Abaixo, a Figura 3 demonstra um diagrama psicrométrico e propriedades.

Figura 3 – Esquema de um diagrama psicrométrico



Fonte: Çengel (2013)

2.3 Secagem de grãos

A secagem de grãos consiste em um processo simultâneo de transferência de calor e massa, onde, através do insuflamento de ar quente, água (umidade) é retirada do produto, conferindo qualidade e integridade durante o armazenamento (Dias, 2015).

O processo de secagem tem por objetivos reduzir a umidade dos grãos, assegurando a armazenagem, tornando-os ideais pra processamento e comercialização, reduzir a proliferação de fungos e bactérias, diminuir o peso a ser transportado e preservar seus nutrientes (Dias, 2015; Tunnermann, 2018).

A secagem ocorre com a movimentação de água do centro dos grãos para sua superfície, evaporando ao entrar em contato com o ar aquecido. O processo de secagem pode ser de dois tipos: natural e artificial (Dias, 2015).

- a) *Secagem natural*: nesse processo, a umidade é removida pelo ar ambiente, aquecido pela energia do sol, sem interferência humana. Os grãos são dispostos em lonas, e revolvidos diversas vezes, para que a secagem seja homogênea. Nesse método, há poucos danos mecânicos e térmicos, porém, é totalmente influenciado pelas condições climáticas. É um processo adequado para quantidades reduzidas de grãos (Tunnermann, 2018).
- b) *Secagem artificial*: meio de secagem onde ar aquecido é forçado a passar pelos grãos, estáticos ou em movimento. Pode ser realizado em baixas temperaturas, onde o ar é levemente aquecido (até 10°C acima da temperatura ambiente), ou, em altas temperaturas, onde o ar é aquecido a mais de 10°C da temperatura ambiente (Tunnermann, 2018).

A massa de ar tem seu potencial de secagem aumentado conforme se aumenta sua temperatura, o que faz com que os processos de secagem em altas temperaturas sejam mais rápidos que os demais (Tunnermann, 2018; Dias, 2015).

2.3.1 Classificação dos secadores

Os secadores podem ser classificados a partir de diversos critérios, como suas características, fluxo de produto e fluxo de ar. A partir de suas características de fabricação, têm-se a seguinte classificação (Tunnermann, 2018):

- a. *Pelo tipo de fabricação*: são classificados em secadores móveis e fixos;
- b. *Pelo sistema de carga*: são os secadores intermitentes (o produto recircula no secador) e contínuos (produto passa apenas uma vez);
- c. *Pela forma de movimentação do ar*: o ar de secagem pode ser insuflado antes da massa de grãos, ou então aspirado após a passagem pelo produto;
- d. *Pelo sentido do fluxo de ar de secagem*: os secadores podem apresentar fluxo concorrente (ar de secagem e fluxo de produto apresentam a mesma direção), fluxo contracorrente (ar de secagem e fluxo de grãos

- fluem em direções opostas), misto (fluxo de ar de secagem ocorre nos dois sentidos) e, cruzado (o fluxo de ar é ortogonal ao fluxo de produto);
- e. *Pela torre de secagem*: são secadores de calhas paralelas, calhas cruzadas, de colunas ou com câmaras de descanso;
 - f. *Pelo sistema de descarga*: de bandejas mecânicas, eclusa rotativa ou descarga pneumática;
 - g. *Pela fonte de calor*: uso de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos;
 - h. *Pelo ar de secagem*: ar direto, quando o ar de combustão está em contato direto com a massa de grãos, e ar indireto, quando se tem um trocador de calor intermediário;
 - i. *Pelo sistema de controle*: sistema manual ou automatizado.

2.3.2 Parâmetros de secagem

De acordo com Dias (2015), a taxa de secagem recebe influência direta dos seguintes parâmetros de processo: temperatura ambiente, umidade relativa do ar ambiente, temperatura de secagem, fluxo de ar de secagem, teor de umidade inicial dos grãos, temperatura máxima suportada pela massa de grãos e velocidade dos grãos no secador.

- a. *Ar ambiente*: a temperatura e umidade do ar ambiente não apresentam grande interferência no processo de secagem a altas temperaturas. As condições do ar ambiente apenas determinam a quantidade de energia a ser fornecida para atingir a temperatura de secagem. Dessa forma, quanto menor a temperatura do ar ambiente, maior será o montante de energia necessário para atingir a temperatura de secagem, elevando os custos do processo.
- b. *Temperatura de secagem*: a temperatura do ar de secagem influencia grandemente a taxa de secagem e a qualidade do produto final. Quanto maior a temperatura de secagem, menor será o consumo de energia por quantidade de água evaporada, e, conseqüentemente, menor será o tempo de secagem. Por outro lado, maiores temperaturas irão ocasionar danos térmicos mais severos aos grãos, comprometendo sua integridade fisiológica ao término do processo.
- c. *Pressão estática e fluxo de ar*: o fluxo de ar de secagem acaba sofrendo perda de carga em contato com os grãos, reduzindo a taxa de secagem.

Assim, quanto maior a espessura da camada de grãos e menor a quantidade de impurezas, mais rápido ocorrerá a secagem.

- d. *Umidade inicial do produto:* grãos com maiores teores de água inicial, terão uma maior quantidade de água evaporada por unidade de energia. Ao reduzir o teor de umidade dos grãos, o processo de secagem tende a ocorrer de maneira mais lenta, pois as forças de interação entre a estrutura do grão e a água adsorvida se intensificam para teores de umidade mais baixos.
- e. *Fluxo de produto durante a secagem:* ao aumentar o fluxo com que o produto passa no secador, o produto final será de melhor qualidade, uma vez que, fica menos tempo exposto ao calor. Porém, a secagem se torna mais lenta, e o consumo de energia maior, pois, devido à velocidade elevada, os grãos perdem menos umidade.

O processo de secagem sofre ainda influência da variedade do grão, do local onde o mesmo foi produzido e das condições climáticas durante a safra. Desse modo, pesquisas vêm sendo realizadas, com o intuito de definir condições físicas e de secagem padrão, para os grãos, e, uma nova variável de processo, chamada teor híbrido. O teor híbrido seria a razão entre a taxa de secagem padrão, para um produto, e a taxa de secagem a uma condição qualquer (Dias, 2015).

3 DESENVOLVIMENTO

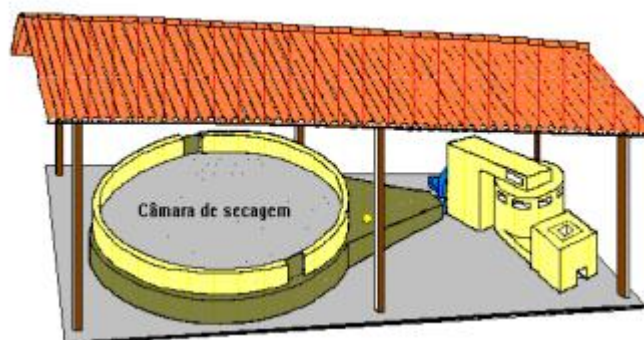
O trabalho tem como base um secador de leito fixo, utilizado por pequenos agricultores, para remoção de umidade dos grãos. O dimensionamento do secador seguiu um modelo existente, com capacidade de secagem de até 4 toneladas de produto. Realizaram-se os cálculos do tempo de secagem, a partir do método de Thompson. Avaliou-se a relação entre o ar de secagem tratado, para remoção de umidade, e a influência sobre o tempo de secagem de diferentes grãos.

3.1 Secadores de leito fixo

São secadores comumente utilizados em pequenas propriedades, composto de uma câmara de secagem, uma câmara de distribuição de ar, um sistema de aquecimento e um ventilador. Nesse tipo de secador, o produto fica disposto em uma base, muitas vezes do próprio silo, com fundo metálico perfurado, permitindo a passagem do ar quente. Para reduzir os custos de instalação, a câmara de secagem pode ser fabricada em alvenaria, tornando-o acessível a pequenos agricultores (Dias, 2015).

O secador de leito fixo tem grande versatilidade, podendo ser utilizado na secagem de diversos grãos e sementes, café e até mesmo feno. A altura da camada de produto varia entre 0,4 m a 1 m, sendo, para grãos, valores entre 0,4 m a 0,6 m. A Figura 4 ilustra as partes de um secador de leito fixo.

Figura 4 - Secador de leito fixo

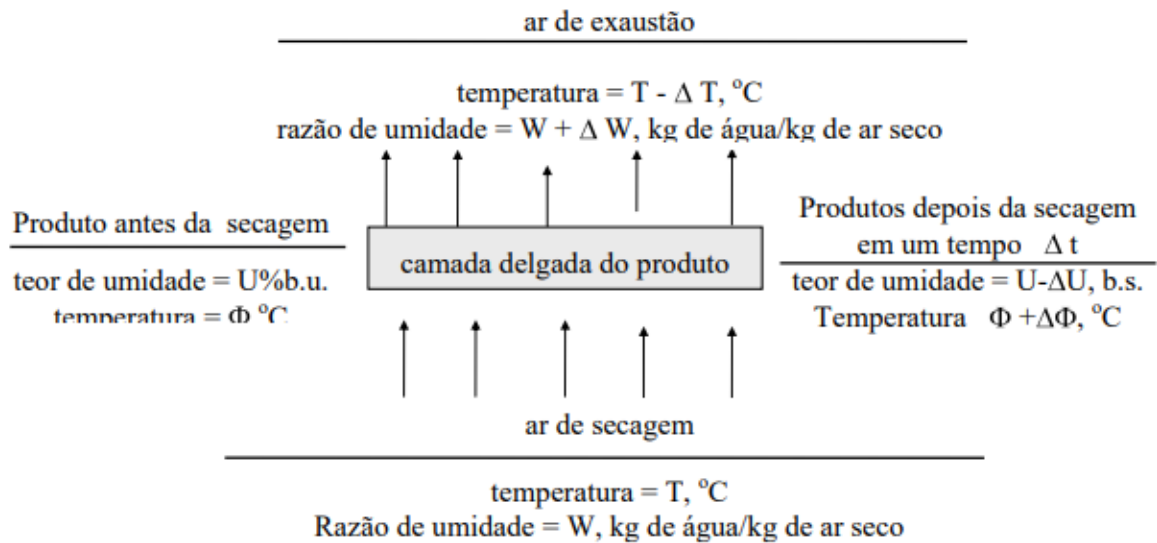


Fonte: Silva et al. (2008)

3.2 Método de Thompson para secagem em leito fixo

As condições de secagem de grãos em leito fixo podem ser calculadas pelo modelo proposto por Thompson et al. (1968), onde o processo de remoção de umidade é dividido em subprocessos, de forma a facilitar os cálculos e o entendimento do processo como um todo. A Figura 5 demonstra como ocorre o processo e suas respectivas divisões:

Figura 5 - Esquema de secagem em camada delgada de acordo com o método do Thompson



Fonte: Cavalcanti Mata (1999)

Para o modelo, são feitas as seguintes considerações:

- O tempo de secagem sofre influência direta da razão de umidade do grão, da espécie de grão e da temperatura de processo;
- A temperatura do grão é igual a temperatura do ar que o envolve;
- O teor de umidade de equilíbrio é dado em função da umidade relativa do ar, do produto processado e da temperatura ambiente;
- O calor latente de vaporização da água, nesse caso, é função do produto.

A razão de umidade do produto é dada por

$$R_u = \frac{u_f - u_e}{u_i - u_e} \quad (18)$$

Onde R_u é a razão de umidade (adimensional), u_f é o teor de umidade final do grão, u_i é o teor de umidade inicial do grão e u_e é o teor de umidade de equilíbrio, todos em base seca.

O tempo de secagem pode ser obtido por

$$t_{sec} = A \ln(R_u) + B [\ln(R_u)]^2 \quad (19)$$

Em que t_{sec} é o tempo de secagem, em horas; A e B são constantes referentes ao produto e temperatura de processo; e, R_u é a razão de umidade.

O calor latente de vaporização da água é dado por

$$c_{l,ag} = (2502,2 - 2,39T_{ar}) (1,0 + E \exp(Fu_f)) \quad (20)$$

Em que $c_{l,ag}$ é o calor latente de vaporização da água, em kJ/kg; E e F são constantes referentes ao produto; e, T_{ar} é a temperatura do ar de secagem, em °C.

O calor específico do produto é calculado por

$$c_{p,gr} = [(M + Nu_f)] * R_c \quad (21)$$

Onde M e N são constantes dependentes do produto; $c_{p,gr}$ é o calor específico do grão, em kJ/kg°C, e R_c é a razão entre a quantidade de matéria seca do produto e a quantidade de ar seco que atravessa a camada, em kg de matéria seca/kg de ar.

A razão entre a quantidade de matéria seca do produto e a quantidade de ar seco que atravessa a camada é dada por:

$$R_c = \frac{\rho_{grao} L v_{ar}}{n \Phi_{ar} 60} \quad (22)$$

Onde ρ_{grao} é a massa específica do grão, em kg/m³; L é a altura da camada, em metros; v_{ar} é o volume específico do ar de secagem; n é o número de camadas; e, Φ_{ar} é a vazão de ar pela área da câmara de secagem, em m³/min m².

A temperatura de equilíbrio entre o ar de secagem e o produto é calculada por:

$$T_{eq} = \frac{(0,24 + 0,45\omega_0)T_{sec} + c_{p,gr}\Phi_0}{(0,24 + 0,45\omega_0 + c_{p,gr})} \quad (23)$$

Onde ω_0 é razão de mistura do ar, em kg água/kg ar seco; T_{sec} é a temperatura de secagem, em °C; $c_{p,gr}$ é o calor específico do grão, em kJ/kg°C; e, Φ_0 é a temperatura do grão, em °C.

A umidade de equilíbrio no processo é dada por:

$$u_e = \left[\frac{-\ln(1 - u_r)}{K(T_{eq} + C)} \right]^{1/N} \quad (24)$$

Onde u_r é a umidade relativa do ar de secagem, em valor decimal; T_{eq} é a temperatura de equilíbrio, em °C; e, N, K e C são constantes referentes ao produto.

Nos Quadros 2, 3 e 4, encontram-se as equações utilizando o modelo de Thompson, já com seus respectivos coeficientes.

Quadro 2 - Equações para cálculo das constantes A e B

Grão	Equações	Fonte
Milho	$A = -1,706 + 0,0088T$ (25) $B = 148,7e^{-0,059T}$ (26)	Thompson et al.
Soja	$A = 0,17359 - 0,0297T + 0,0006027T^2 - 0,00000333T^3$ (27) $B = -0,2661 + 0,2116T - 0,0454T^2 + 0,00002549T^3$ (28)	Cavalcanti Mata
Arroz	$A = (-2445,06 + 82,79T - 1,023T^2 + 0,004267T^3)/60$ (29) $B = (-449,68 + 14,52T - 0,182T^2 + 0,000756T^3)/60$ (30)	Cavalcanti Mata
Trigo	$A = -1,6023 + 0,008801T - 0,000335T^2 + 0,000002777T^3$ (31) $B = 0,497 e^{(-T-32,2)/1,888} + 0,1027 e^{(-T-32,2)/40,22}$ (32)	Brokker et al.

Fonte: Cavalcanti Mata (1999), adaptado.

Quadro 3 - Equações para cálculo da umidade de equilíbrio

Grão	Umidade de equilíbrio	Fonte
Milho	$u_e = 120,6 \left[\frac{-\ln(1 - \omega)}{(T + 45,6)} \right]^{0,5}$ (33)	Thompson et al. (1968)
Soja	$u_e = \left[\frac{-\ln(1 - \omega)}{(30,533 * 10^{-5}(T + 134,13))} \right]^{0,8221}$ (34)	ASAE Standard (1984)
Arroz	$u_e = \left[\frac{-\ln(1 - \omega)}{(1,9187 * 10^{-5}(T + 51,161))} \right]^{0,409}$ (35)	ASAE Standard (1984)
Trigo	$u_e = \left[\frac{-\ln(1 - \omega)}{(1,2299 * 10^{-5}(T + 64,346))} \right]^{0,3912}$ (36)	ASAE Standard (1984)

Fonte: Cavalcanti Mata (1999), adaptado.

Quadro 4 - Equações para cálculo do calor específico

Grão	Equação	Fonte
Milho	$c_{p,milho} = 0,35 + 0,851 \left(\frac{u_f}{(100 + u_f)} \right)$ (37)	Brokker et al. (1992)
Soja	$c_{p,soja} = 0,391 + 0,461 \left(\frac{u_f}{(100 + u_f)} \right)$ (38)	ASAE Standard (1984)
Arroz	$c_{p,arroz} = 0,278 + 0,96 \left(\frac{u_f}{(100 + u_f)} \right)$ (39)	Cavalcanti Mata (1992)
Trigo	$c_{p,trigo} = 0,288 + 0,828 \left(\frac{u_f}{(100 + u_f)} \right)$ (40)	ASAE Standard (1984)

Fonte: Cavalcanti Mata (1999), adaptado.

3.3 Softwares utilizados

As propriedades psicrométricas do ar de secagem foram calculadas a partir do software GRAPSI 5.1, desenvolvido na Universidade Estadual de Viçosa. Para iniciar os cálculos, o programa oferece as opções de entrada de altitude ou pressão atmosférica, seguido da entrada de temperatura de bulbo seco. Então, há a opção de fornecer o valor da temperatura de bulbo úmido, do ponto de orvalho ou da umidade relativa do ar. As demais propriedades do ar úmido são retornadas pelo programa. Têm-se também a opção de trabalhar com processos psicrométricos. A Figura 6 apresenta um exemplo de dados retornados pelo programa, para a cidade de Ponta Grossa, Paraná (altitude de 975 m).

Figura 6 - Interface do programa GRAPSI 5.1

The screenshot shows the GRAPSI 5.1 software interface. On the left, there are input fields for 'Altitude (m)' (975) and 'Pressão atmosférica (kPa)' (90,600). A 'Gráfico' section contains 'Tbs (°C)' (90) and 'UR (%)' (40). Below this is the 'Processos' section with radio buttons for 'Aquecimento ou resfriamento', 'Umidificação adiabática (dado umidade relativa final)', 'Umidificação adiabática (dado razão de mistura final)', and 'Mistura de dois fluxos de ar'. The 'Mistura de dois fluxos de ar' option is selected, and it includes a table of input fields for two air streams: Temperature dry bulb, Relative humidity, and Air flow rate. On the right, the 'Psicrômetro' section displays the results of the calculation for a state point, listing various psychrometric properties.

Ponto de Estado - Conhecidos Tbs e UR	
Temperatura de bulbo seco(oC)	90,0
Temperatura de bulbo úmido(oC)	68,3
Temperatura do ponto de orvalho(oC)	67,6
Umidade relativa(%).....	40,00
Razão de mistura (g/kg)	279,00
Grau de saturação	0,13
Pressão de vapor(kPa).....	28,06
Pressão de vapor de saturação(kPa)	70,14
Pressão atmosférica(kPa)	90,600
Entalpia(kJ/kg)	832,88
Volume específico(m ³ /kg)	1,667

Fonte: Autoria própria (2022)

Os cálculos foram desenvolvidos no software GNU Octave™ e os gráficos foram plotados com o auxílio do software OriginLab™.

4 RESULTADOS

O secador adotado para todos os cálculos foi um secador de leito fixo, com capacidade de 4,95 m³ de produto, típico de pequenas e médias propriedades rurais. As dimensões do secador encontram-se no Quadro 5:

Quadro 5 - Dimensões do secador

Raio da câmara de secagem (m)	Altura máxima de coluna de grãos (m)	Volume de ar insuflado (m ³ /min)	Área de secagem (m ²)	Fluxo de ar de secagem (m ³ /min m ²)
1,5	0,70	30,04	7,07	4,25

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir desses dados, o processo de secagem foi simulado para grãos de milho, soja, arroz e trigo, com diferentes valores de umidade inicial, simulando dados reais de umidade após colheita. Os valores escolhidos para umidade final do produto são os utilizados na armazenagem e comercialização. Para cada grão, foram consideradas três temperaturas de secagem, de acordo com a temperatura de secagem máxima suportada pelo grão, com variações apenas na umidade relativa do ar. Os dados referentes às propriedades do ar de secagem foram calculados para a altitude de 975 m, e encontram-se nos Quadros 6, 7 e 8:

Quadro 6 - Propriedades do ar úmido com 60% de umidade relativa

Temperatura de bulbo seco (°C)	60	70	75	80	90
Temperatura de bulbo úmido (°C)	52,2	59,2	63,7	68,3	77,3
Ponto de orvalho (°C)	49,4	58,6	63,3	67,9	77,1
Umidade relativa (%)	60	60	60	60	60
Razão de mistura ($kg_{vapor}/kg_{ar\ seco}$)	0,09459	0,16185	0,21337	0,28442	0,53949
Grau de saturação	0,54	0,50	0,46	0,42	0,25
Entalpia (kJ/kg)	307,01	495,32	637,49	832,21	1526,00
Volume específico (m ³ /kg)	1,216	1,370	1,482	1,631	2,149

Fonte: Autoria própria (2022)

Quadro 7 – Propriedades do ar úmido com 40% de umidade relativa

Temperatura de bulbo seco (°C)	60	70	75	80	90
Temperatura de bulbo úmido (°C)	43,1	51,6	55,8	59,9	68,3
Ponto de orvalho (°C)	41,5	50,2	54,6	58,9	67,6
Umidade relativa (%)	40	40	40	40	40
Razão de mistura ($kg_{vapor}/kg_{ar\ seco}$)	0,06002	0,09929	0,12765	0,16454	0,279
Grau de saturação	0,34	0,30	0,28	0,24	0,13
Entalpia (kJ/kg)	216,86	331,08	411,70	515,35	832,88
Volume específico (m³/kg)	1,157	1,261	1,329	1,415	1,667

Fonte: Autoria própria (2022)

Quadro 8 - Propriedades do ar úmido com 20% de umidade relativa

Temperatura de bulbo seco (°C)	60	70	75	80	90
Temperatura de bulbo úmido (°C)	34,2	41,0	44,4	47,9	54,9
Ponto de orvalho (°C)	28,9	36,9	40,8	44,8	52,6
Umidade relativa (%)	20	20	20	20	20
Razão de mistura ($kg_{vapor}/kg_{ar\ seco}$)	0,02863	0,04598	0,05789	0,07266	0,11394
Grau de saturação	0,16	0,14	0,13	0,11	0,05
Entalpia (kJ/kg)	135,01	191,12	227,93	272,51	393,71
Volume específico (m³/kg)	1,104	1,168	1,206	1,250	1,361

Fonte: Autoria própria (2022)

Os resultados obtidos, para cada espécie de grão, encontram-se a seguir.

4.1 Secagem de milho

Foram simulados, matematicamente, três processos de secagem de milho, com três temperaturas distintas (60°C, 75°C e 90°C), e variações de umidade relativa (60%, 40% e 20%), considerando uma camada de grãos de altura de 40 cm, fluxo máximo de ar de secagem e densidade do milho como 720kg/m³.

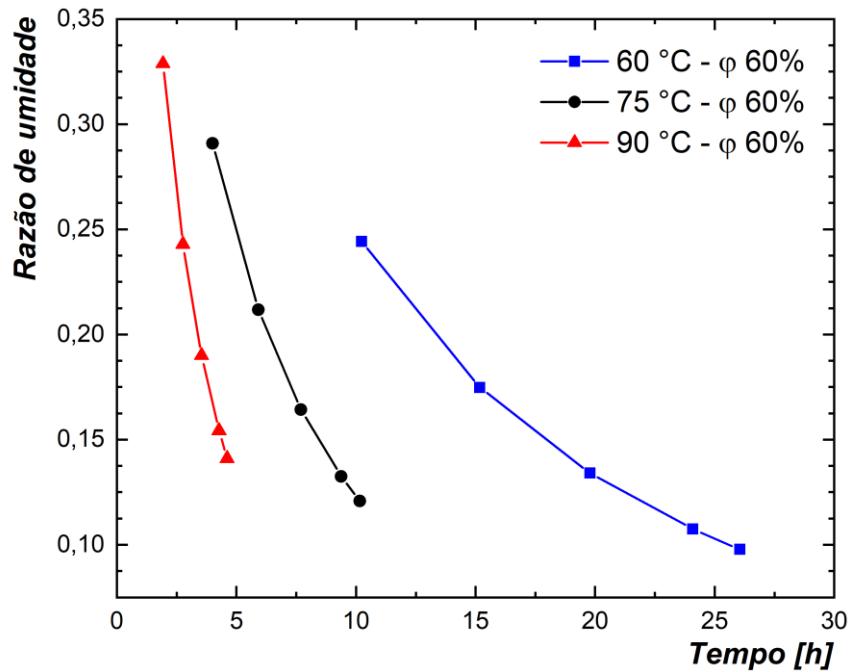
A partir da Tabela 3 e do Gráfico 1, pode-se perceber que, quanto maior a temperatura de secagem, maior será a razão de umidade para os grãos de milho. Para a mesma umidade relativa do ar, o aumento da temperatura de secagem de 60°C para 75°C, promove uma redução de cerca de 61% do tempo de secagem. Ao se trabalhar com a temperatura de secagem de 90°C, há redução de cerca de 82% do tempo de secagem inicial.

Tabela 3 – Dados de cálculo para secagem de milho com umidade relativa do ar de 60%

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura do ar de secagem (°C)	Umidade relativa do ar insuflado (%)	Razão de mistura	Volume específico (m ³ /kg)	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	14	60	60	0,09459	1,216	0,0978	26,1
24	14	60	60	0,09459	1,216	0,1075	24,1
22	14	60	60	0,09459	1,216	0,1341	19,8
20	14	60	60	0,09459	1,216	0,1748	15,2
18	14	60	60	0,09459	1,216	0,2443	10,2
25	14	75	60	0,21337	1,482	0,1209	10,2
24	14	75	60	0,21337	1,482	0,1325	9,4
22	14	75	60	0,21337	1,482	0,1642	7,7
20	14	75	60	0,21337	1,482	0,2118	5,9
18	14	75	60	0,21337	1,482	0,2908	4,0
25	14	90	60	0,53949	2,149	0,1410	4,6
24	14	90	60	0,53949	2,149	0,1543	4,3
22	14	90	60	0,53949	2,149	0,1900	3,5
20	14	90	60	0,53949	2,149	0,2429	2,8
18	14	90	60	0,53949	2,149	0,3287	1,9

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 1- Dados de secagem de milho com umidade relativa do ar de 60%



Fonte: Autoria própria (2022)

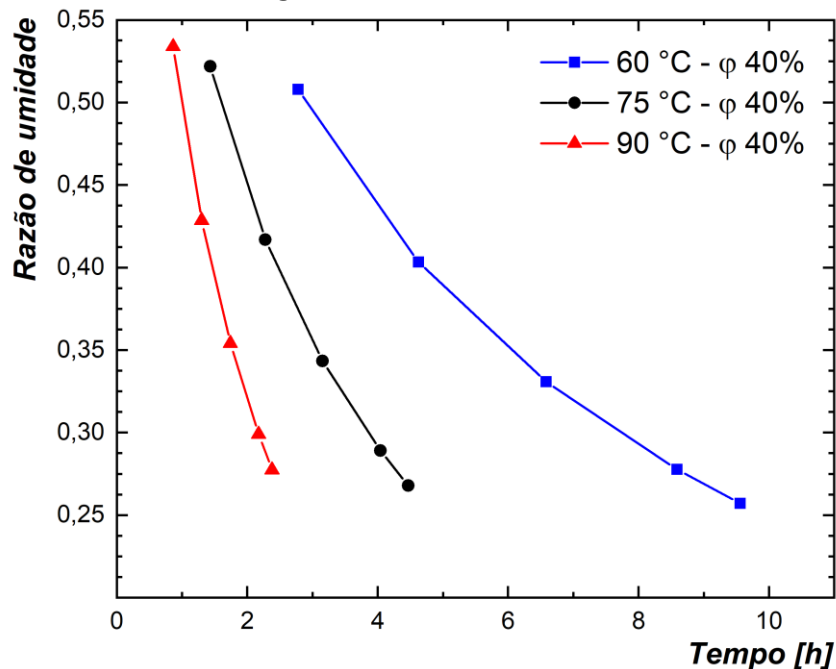
A partir da Tabela 4 e do Gráfico 2, pode-se perceber que, com a redução da umidade relativa do ar para 40%, o aumento da temperatura de secagem para 75°C provoca uma redução de 51,5% do tempo de secagem. Ao aumentar a temperatura de secagem, de 60°C para 90°C, ocorre uma redução de 72,8% no tempo de secagem.

Tabela 4 – Dados de cálculo para secagem de milho com umidade relativa do ar de 40%

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura do ar de secagem (°C)	Umidade relativa do ar insuflado (%)	Razão de mistura	Volume específico (m ³ /kg)	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	14	60	40	0,06002	1,157	0,2570	9,6
24	14	60	40	0,06002	1,157	0,2777	8,6
22	14	60	40	0,06002	1,157	0,3308	6,6
20	14	60	40	0,06002	1,157	0,4034	4,6
18	14	60	40	0,06002	1,157	0,5078	2,8
25	14	75	40	0,1276	1,329	0,2679	4,5
24	14	75	40	0,1276	1,329	0,2890	4,0
22	14	75	40	0,1276	1,329	0,3433	3,2
20	14	75	40	0,1276	1,329	0,4169	2,3
18	14	75	40	0,1276	1,329	0,5218	1,4
25	14	90	40	0,2790	1,667	0,2774	2,4
24	14	90	40	0,2790	1,667	0,2990	2,2
22	14	90	40	0,2790	1,667	0,3542	1,7
20	14	90	40	0,2790	1,667	0,4286	1,3
18	14	90	40	0,2790	1,667	0,5338	0,9

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 2 - Dados de secagem de milho com umidade relativa do ar de 40%



Fonte: Autoria própria (2022)

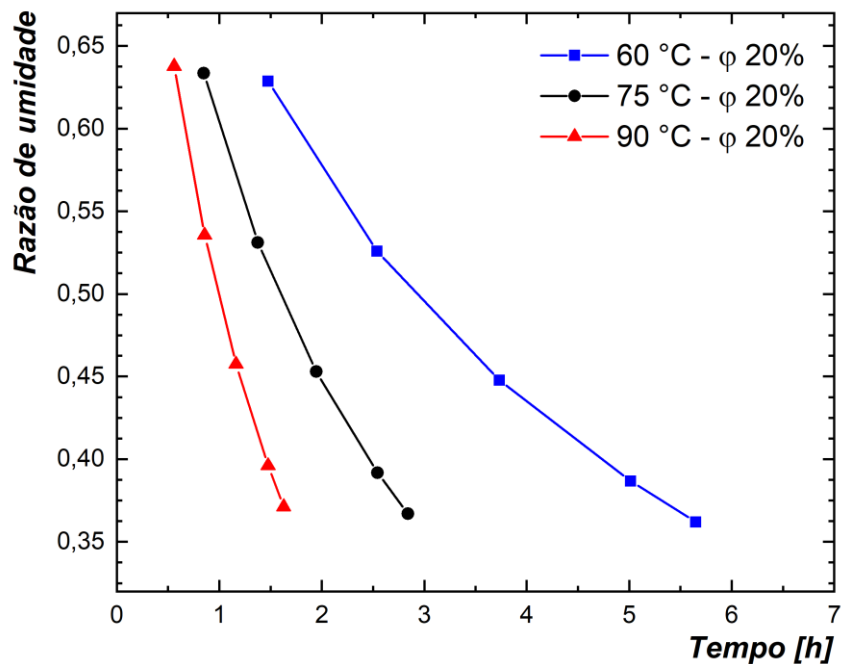
A partir da Tabela 5 e do Gráfico 3, com umidade relativa do ar de secagem de 20%, ao aumentar a temperatura de secagem de 60°C para 75°C, houve um decréscimo de 47% no tempo de secagem. Quando o aumento ocorre de 60°C para 90°C, observa-se uma redução de 67,8% no tempo de secagem.

Tabela 5 – Dados de cálculo para secagem de milho com umidade relativa do ar de 20%

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura do ar de secagem (°C)	Umidade relativa do ar insuflado (%)	Razão de mistura	Volume específico (m ³ /kg)	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	14	60	20	0,02863	1,104	0,3620	5,7
24	14	60	20	0,02863	1,104	0,3867	5,0
22	14	60	20	0,02863	1,104	0,4477	3,7
20	14	60	20	0,02863	1,104	0,5258	2,5
18	14	60	20	0,02863	1,104	0,6286	1,5
25	14	75	20	0,05789	1,206	0,3669	2,8
24	14	75	20	0,05789	1,206	0,3917	2,5
22	14	75	20	0,05789	1,206	0,4529	1,9
20	14	75	20	0,05789	1,206	0,5310	1,4
18	14	75	20	0,05789	1,206	0,6335	0,8
25	14	90	20	0,1139	1,361	0,3711	1,6
24	14	90	20	0,1139	1,361	0,3961	1,5
22	14	90	20	0,1139	1,361	0,4575	1,2
20	14	90	20	0,1139	1,361	0,5356	0,9
18	14	90	20	0,1139	1,361	0,6377	0,6

Fonte: autoria própria (2022)

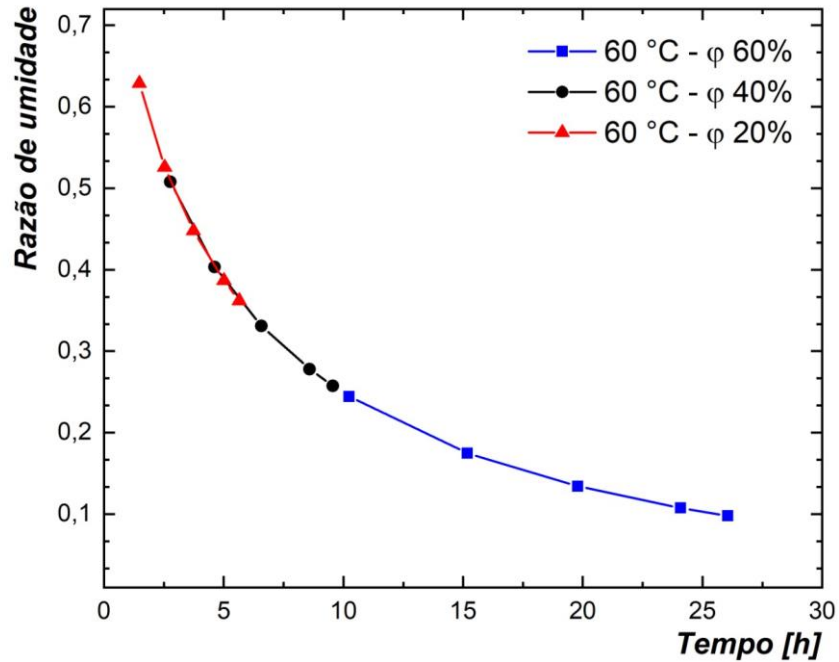
Gráfico 3 - Dados de secagem de milho com umidade relativa do ar de 20%



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a temperatura do ar de secagem de 60°C, com a redução da umidade relativa de 60% para 40%, ocorre uma redução média do tempo de secagem de 67%. Ao reduzir a umidade relativa do ar de 60% para 20%, o tempo de secagem sofre redução média de 81,5%, conforme representado no Gráfico 4.

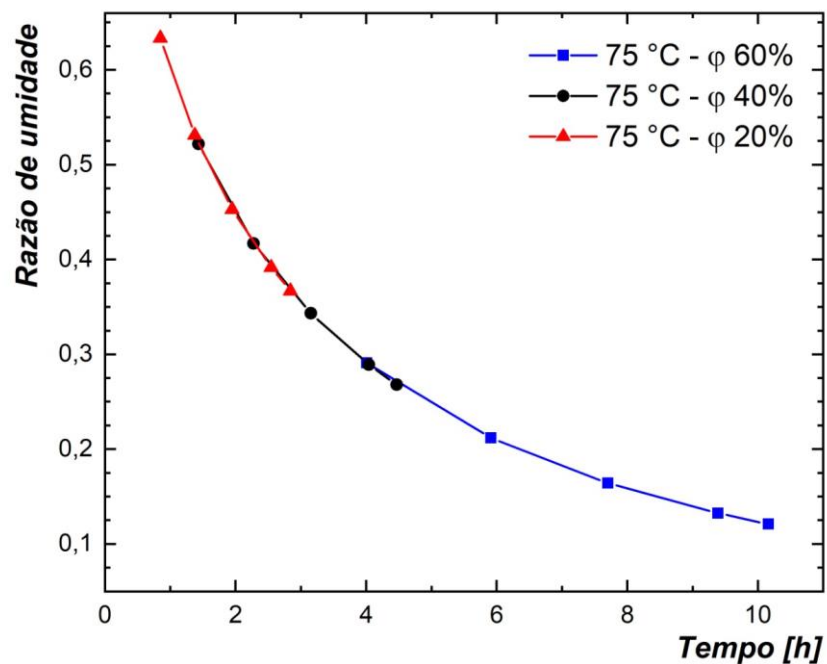
Gráfico 4 – Milho: secagem a 60°C com variação da umidade relativa do ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a temperatura do ar de secagem de 75°C (Gráfico 5), ao reduzir a umidade relativa de 60% para 40%, o tempo de secagem apresenta redução média de 59,5%. Com a redução da umidade relativa do ar de 60% para 20%, ocorre redução média do tempo de secagem de 75,5%.

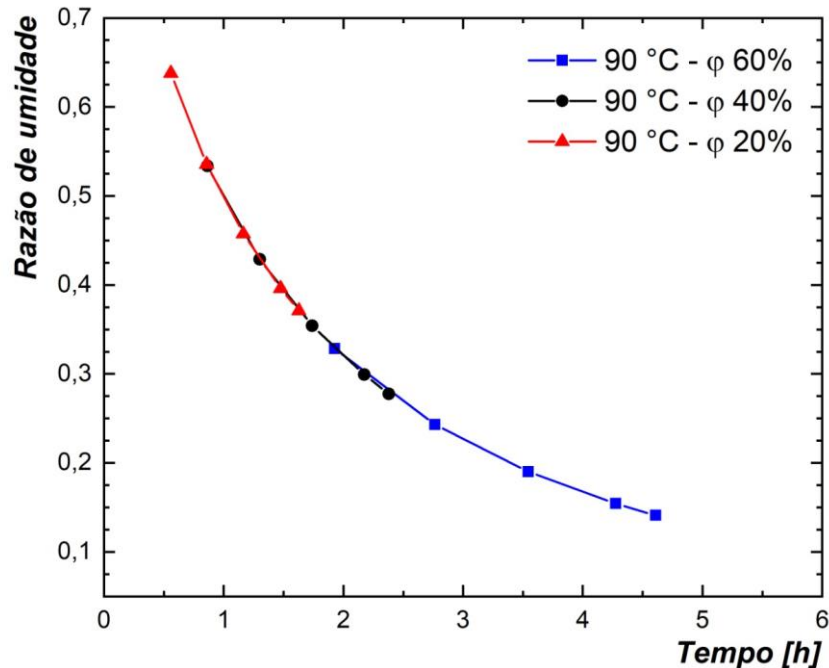
Gráfico 5 – Milho: secagem a 75°C com variação da umidade relativa do ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a temperatura do ar de secagem de 90°C, esquematizada no Gráfico 6, ao reduzir a umidade relativa de 60% para 40%, ocorre redução média de 51% no tempo de secagem. Com a redução da umidade relativa do ar de 60% para 20%, ocorre redução média do tempo de secagem de 66,5%.

Gráfico 6 – Milho: secagem a 90°C com variação da umidade relativa do ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 Secagem de soja

Foram calculados dois processos de secagem de soja, com três temperaturas distintas (60°C, 75°C e 90°C), e variações de umidade relativa (60% e 40%), considerando uma camada de grãos de altura de 60 cm, fluxo máximo de ar de secagem e densidade da soja como 770kg/m³.

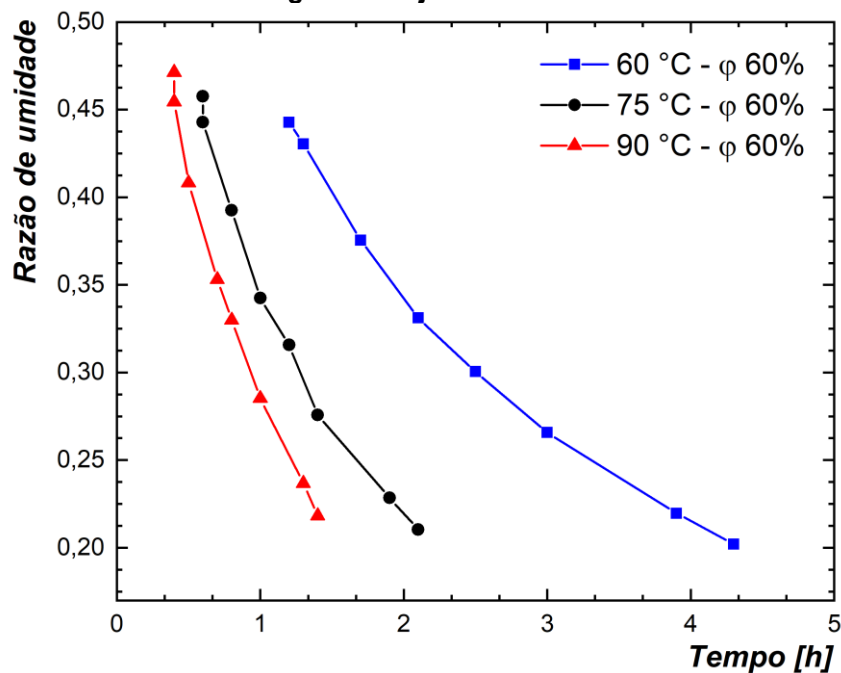
A partir da Tabela 6 e do Gráfico 7, pode-se perceber que, quanto maior a temperatura de secagem, maior é a razão de umidade para os grãos de soja. Para a mesma umidade relativa do ar, o aumento da temperatura de secagem de 60°C para 75°C, promove uma redução média de 52% do tempo de secagem. Ao se trabalhar com a temperatura de secagem de 90°C, há redução de cerca de 68% do tempo de secagem inicial.

Tabela 6 – Dados de cálculo para secagem de soja com umidade relativa do ar de 60%.

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura de secagem (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Razão de mistura	Volume específico (m ³ /kg)	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	14	60	60	0,09459	1,216	0,20214	4,3
24	14	60	60	0,09459	1,216	0,21967	3,9
22	14	60	60	0,09459	1,216	0,26575	3,0
18	13	60	60	0,09459	1,216	0,30049	2,5
20	14	60	60	0,09459	1,216	0,33113	2,1
17	13	60	60	0,09459	1,216	0,3755	1,7
18	14	60	60	0,09459	1,216	0,4304	1,3
25	14	75	60	0,21337	1,482	0,2104	2,1
24	14	75	60	0,21337	1,482	0,2285	1,9
22	14	75	60	0,21337	1,482	0,2757	1,4
18	13	75	60	0,21337	1,482	0,3158	1,2
20	14	75	60	0,21337	1,482	0,3425	1,0
17	13	75	60	0,21337	1,482	0,3925	0,8
18	14	75	60	0,21337	1,482	0,4428	0,6
25	14	90	60	0,53949	2,149	0,2183	1,4
24	14	90	60	0,53949	2,149	0,2368	1,3
22	14	90	60	0,53949	2,149	0,2852	1,0
18	13	90	60	0,53949	2,149	0,33	0,8
20	14	90	60	0,53949	2,149	0,3531	0,7
17	13	90	60	0,53949	2,149	0,4082	0,5
18	14	90	60	0,53949	2,149	0,4544	0,4

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 7 – Dados de secagem de soja com umidade relativa do ar de 60%



Fonte: Autoria própria (2022)

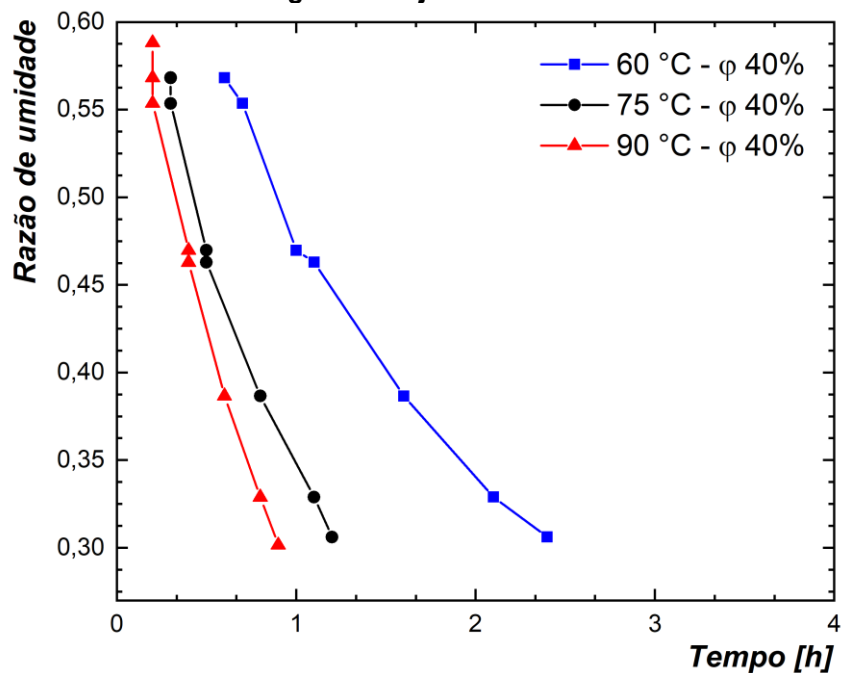
Com a redução de umidade relativa do ar de 60% para 40%, o aumento da temperatura de secagem de 60°C para 75°C provoca redução de cerca de 51% do tempo de secagem. Ao aumentar a temperatura de secagem de 60°C para 90°C, o tempo de secagem reduz em 64%, conforme Tabela 7 e Gráfico 8.

Tabela 7 – Dados de cálculo para secagem de soja com umidade relativa do ar de 40%.

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura do ar de secagem (°C)	Umidade relativa do ar insuflado (%)	Razão de mistura	Volume específico (m ³ /kg)	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	14	60	40	0,06002	1,157	0,3061	2,4
24	14	60	40	0,06002	1,157	0,3289	2,1
22	14	60	40	0,06002	1,157	0,3865	1,6
18	13	60	40	0,06002	1,157	0,4629	1,1
20	14	60	40	0,06002	1,157	0,4697	1,0
17	13	60	40	0,06002	1,157	0,5536	0,7
18	14	60	40	0,06002	1,157	0,5682	0,6
25	14	75	40	0,1276	1,329	0,3061	1,2
24	14	75	40	0,1276	1,329	0,3289	1,1
22	14	75	40	0,1276	1,329	0,3865	0,8
18	13	75	40	0,1276	1,329	0,4629	0,5
20	14	75	40	0,1276	1,329	0,4697	0,5
17	13	75	40	0,1276	1,329	0,5535	0,3
18	14	75	40	0,1276	1,329	0,5681	0,3
25	14	90	40	0,2790	1,667	0,3016	0,9
24	14	90	40	0,2790	1,667	0,3289	0,8
22	14	90	40	0,2790	1,667	0,3866	0,6
18	13	90	40	0,2790	1,667	0,4629	0,4
20	14	90	40	0,2790	1,667	0,4697	0,4
17	13	90	40	0,2790	1,667	0,5536	0,2

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 8 – Dados de secagem de soja com 40% de umidade relativa do ar



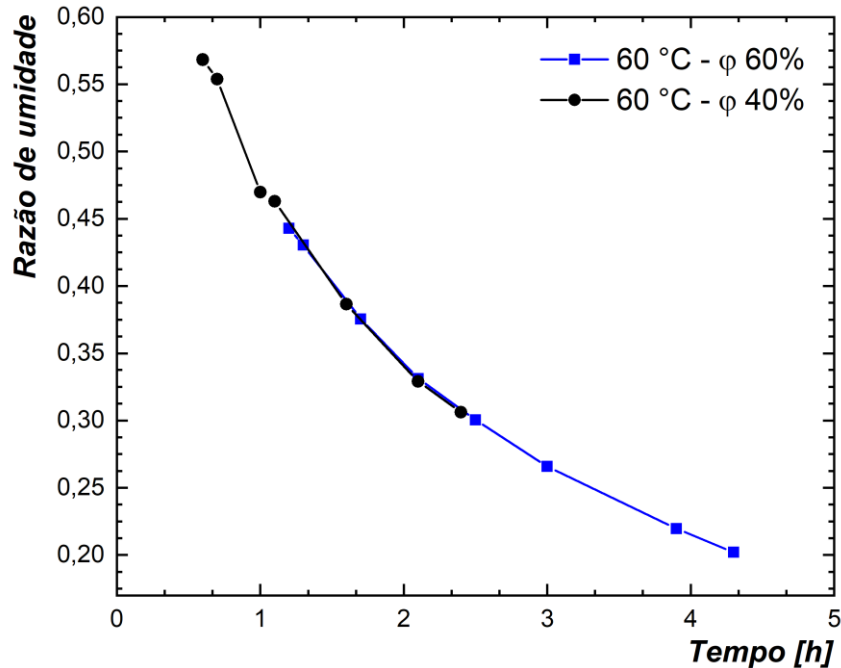
Fonte: Autoria própria (2022)

Os cálculos considerando umidade relativa do ar de secagem de 20%, retornaram valores de teor de umidade final da soja abaixo dos aceitados comercialmente, portanto, a secagem com 20% de umidade relativa do ar, se

realizada, acarretará na desidratação extrema dos grãos, comprometendo sua qualidade.

Ao analisar o Gráfico 9, e, com a redução de umidade relativa do ar de 60% para 40%, para a secagem em 60°C, é possível observar uma redução de média de 51% do tempo de secagem.

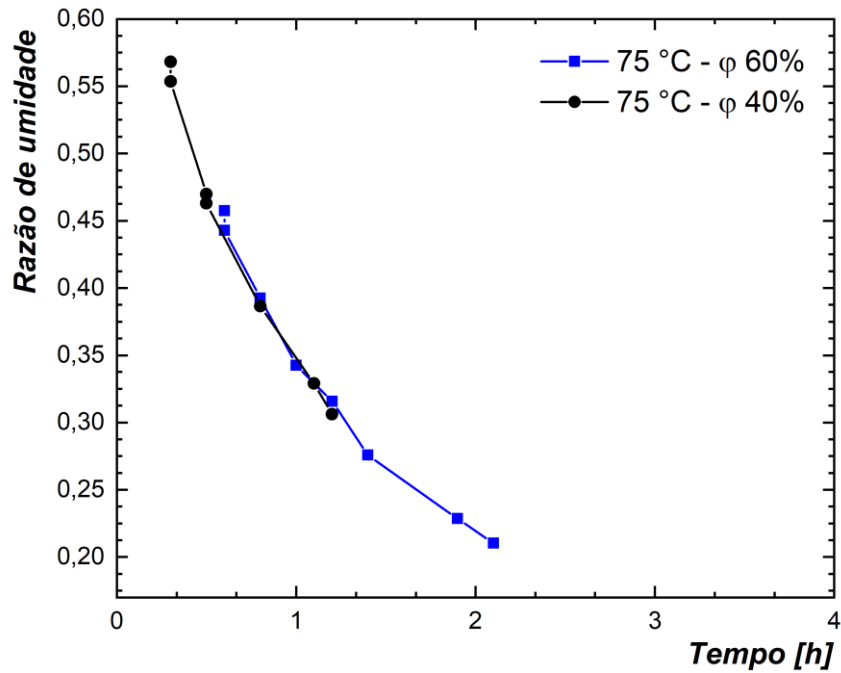
Gráfico 9 - Soja: secagem a 60°C com variação da umidade relativa do ar



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o Gráfico 10, com a redução de umidade relativa do ar de 60% para 40%, a secagem de soja a 75°C sofre redução média de 49,8% do tempo de secagem.

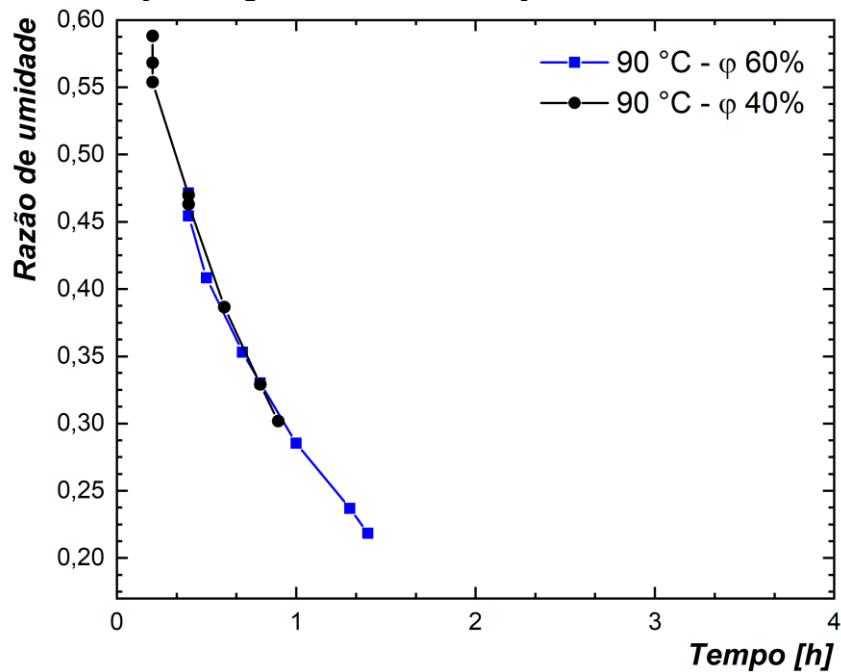
Gráfico 10 - Soja: secagem a 75°C com variação da umidade relativa do ar



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a secagem a 90°C, a redução de umidade relativa do ar de 60% para 40%, provoca redução média do tempo de secagem em 45%, conforme expresso no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Soja: secagem a 90°C com variação da umidade relativa do ar



Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 Secagem de arroz

Realizou-se a simulação de três processos de secagem de arroz, com três temperaturas distintas (60°C, 75°C e 90°C), e, variações de umidade relativa (60%, 40% e 20%), considerando uma camada de grãos de altura de 60 cm, fluxo máximo de ar de secagem e densidade do arroz como 600kg/m³.

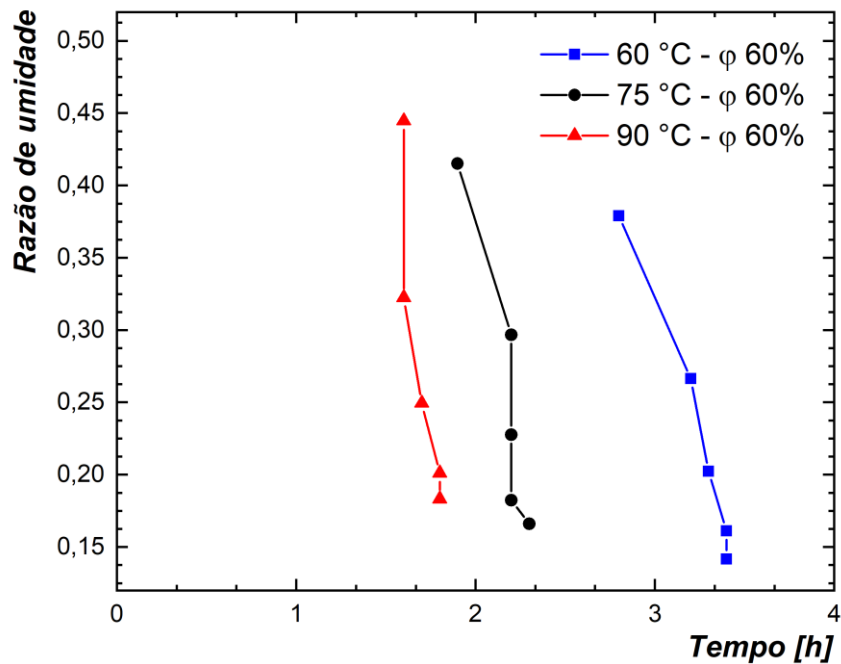
A partir da Tabela 8 e do Gráfico 12, pode-se perceber que, assim como o milho e a soja, para os grãos de arroz, quanto maior a temperatura de secagem, maior será a razão de umidade. Para a mesma umidade relativa do ar, o aumento da temperatura de secagem de 60°C para 75°C, promove uma redução de cerca de 32% do tempo de secagem. Ao se trabalhar com a temperatura de secagem de 90°C, há redução de cerca de 47% do tempo de secagem inicial.

Tabela 8 – Dados de cálculo para secagem de arroz com umidade relativa do ar de 60%.

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura do ar de secagem (°C)	Umidade relativa do ar insuflado (%)	Razão de mistura	Volume específico (m ³ /kg)	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	15	60	60	0,09459	1,216	0,1416	3,4
24	15	60	60	0,09459	1,216	0,1611	3,4
22	15	60	60	0,09459	1,216	0,2023	3,3
20	15	60	60	0,09459	1,216	0,2664	3,2
18	15	60	60	0,09459	1,216	0,3790	2,8
25	15	75	60	0,21337	1,482	0,1659	2,3
24	15	75	60	0,21337	1,482	0,1824	2,2
22	15	75	60	0,21337	1,482	0,2276	2,2
20	15	75	60	0,21337	1,482	0,2968	2,2
18	15	75	60	0,21337	1,482	0,4151	1,9
25	15	90	60	0,53949	2,149	0,1833	1,9
24	15	90	60	0,53949	2,149	0,2011	1,8
22	15	90	60	0,53949	2,149	0,2495	1,7
20	15	90	60	0,53949	2,149	0,3226	1,6
18	15	90	60	0,53949	2,149	0,4447	1,6

Fonte: Autoria propria (2022)

Gráfico 12 - Dados de secagem do arroz com umidade relativa do ar em 60%



Fonte: Autoria própria (2022)

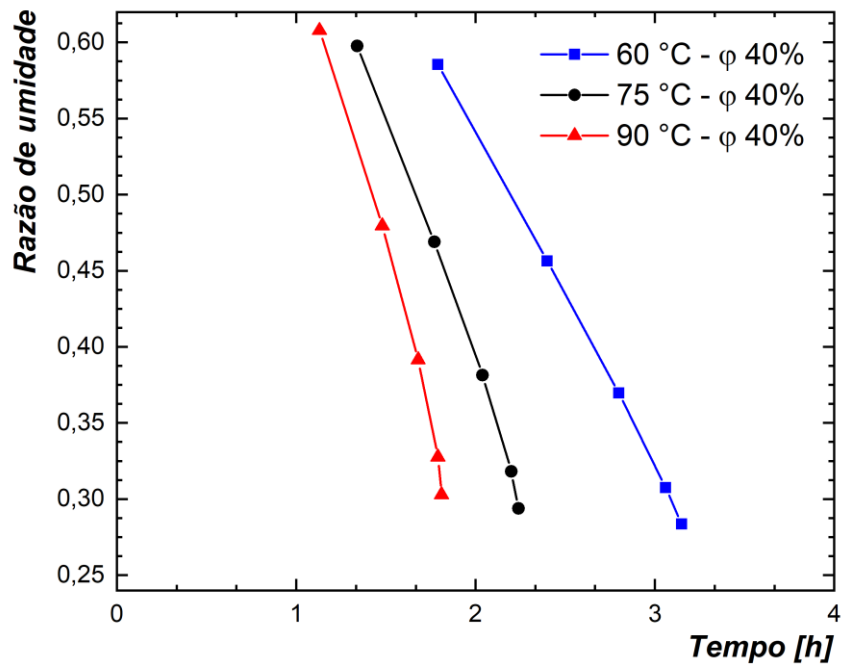
Com a análise da Tabela 9 e Gráfico 13, pode-se perceber que, com a redução de umidade, com o aumento da temperatura de secagem de 60°C para 75°C, têm-se uma redução do tempo de secagem de 27%; e, para o aumento de 60°C até 90°C, a redução do tempo de secagem é de cerca de 39,8%.

Tabela 9 – Dados de cálculo para secagem de arroz com umidade relativa do ar de 40%.

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura do ar de secagem (°C)	Umidade relativa do ar insuflado (%)	Razão de mistura	Volume específico (m ³ /kg)	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	15	60	40	0,06002	1,157	0,2836	3,15
24	15	60	40	0,06002	1,157	0,3075	3,06
22	15	60	40	0,06002	1,157	0,3696	2,80
20	15	60	40	0,06002	1,157	0,4565	2,40
18	15	60	40	0,06002	1,157	0,5855	1,79
25	15	75	40	0,12765	1,329	0,2938	2,24
24	15	75	40	0,12765	1,329	0,3182	2,20
22	15	75	40	0,12765	1,329	0,3813	2,04
20	15	75	40	0,12765	1,329	0,4689	1,77
18	15	75	40	0,12765	1,329	0,5976	1,34
25	15	90	40	0,279	1,667	0,3029	1,81
24	15	90	40	0,279	1,667	0,3276	1,79
22	15	90	40	0,279	1,667	0,3915	1,68
20	15	90	40	0,279	1,667	0,4796	1,48
18	15	90	40	0,279	1,667	0,6079	1,13

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 13 - Dados de secagem do arroz com umidade relativa do ar de 40%



Fonte: Autoria própria (2022)

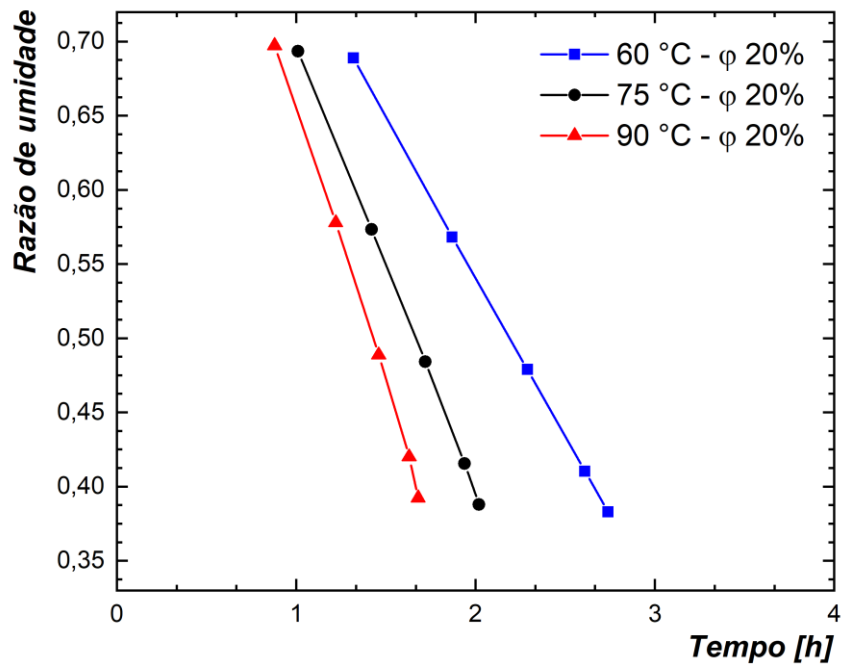
A partir da Tabela 10 e do Gráfico 14, pode-se perceber que, com a redução de umidade para 20%, ao aumentar a temperatura de secagem de 60°C para 75°C, ocorre redução de 25% do tempo de secagem. Ao elevar a temperatura para 90°C, com relação a temperatura de 60°C, o processo apresenta 36% de redução de tempo.

Tabela 10 – Dados de cálculo para secagem de arroz com umidade relativa do ar de 20%.

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura do ar de secagem (°C)	Umidade relativa do ar insuflado (%)	Razão de mistura	Volume específico (m³/h)	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	15	60	20	0,02863	1,104	0,3829	2,74
24	15	60	20	0,02863	1,104	0,4103	2,61
22	15	60	20	0,02863	1,104	0,4789	2,29
20	15	60	20	0,02863	1,104	0,5683	1,87
18	15	60	20	0,02863	1,104	0,6889	1,32
25	15	75	20	0,05789	1,206	0,3879	2,02
24	15	75	20	0,05789	1,206	0,4154	1,94
22	15	75	20	0,05789	1,206	0,4842	1,72
20	15	75	20	0,05789	1,206	0,5735	1,42
18	15	75	20	0,05789	1,206	0,6934	1,01
25	15	90	20	0,11394	1,361	0,3923	1,68
24	15	90	20	0,11394	1,361	0,4200	1,63
22	15	90	20	0,11394	1,361	0,4888	1,46
20	15	90	20	0,11394	1,361	0,5780	1,22
18	15	90	20	0,11394	1,361	0,6973	0,88

Fonte: autoria própria (2022)

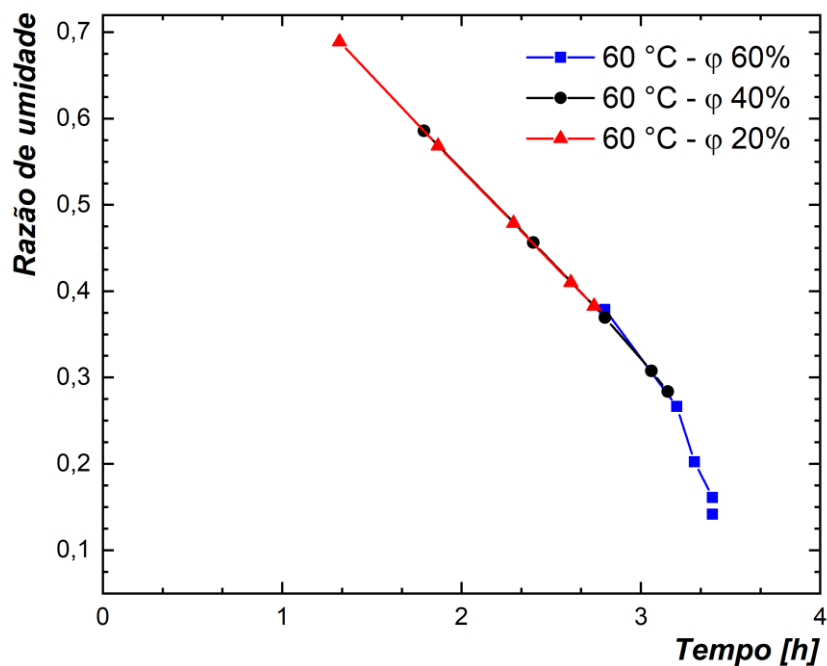
Gráfico 14 - Dados de secagem do arroz com umidade relativa do ar de 20%



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a temperatura do ar de secagem de 60°C, ao reduzir a umidade relativa de 60% para 40%, ocorre uma redução média do tempo de secagem de 18%. Ao reduzir a umidade relativa do ar de 60% para 20%, o tempo de secagem sofre redução média de 33%, conforme o Gráfico 15.

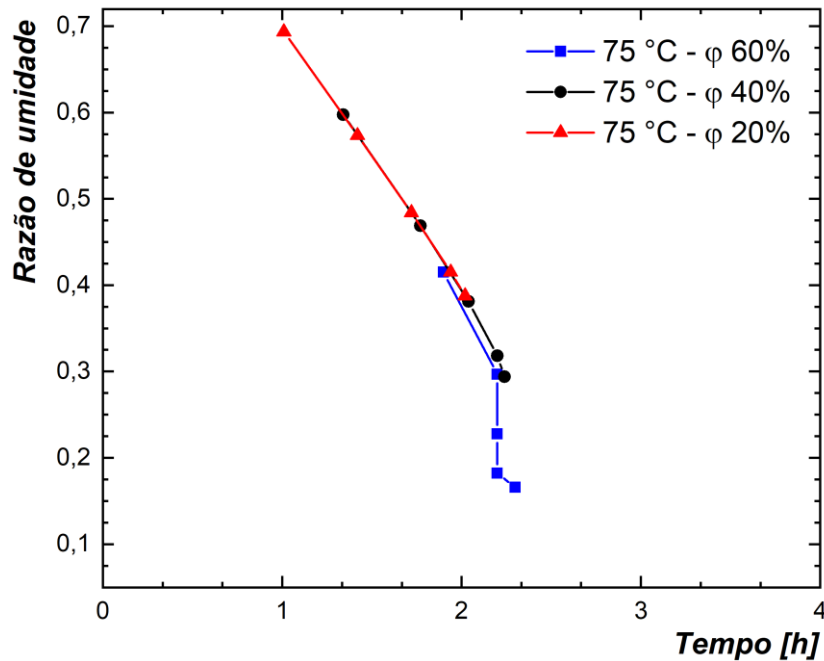
Gráfico 15 – Arroz: secagem a 60°C com variação da umidade relativa do ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a temperatura do ar de secagem de 75°C (Gráfico 16), com a redução da umidade relativa de 60% para 40%, o tempo de secagem apresenta redução média de 12%. Ao reduzir a umidade relativa do ar de 60% para 20%, o tempo de secagem sofre redução média de 26%.

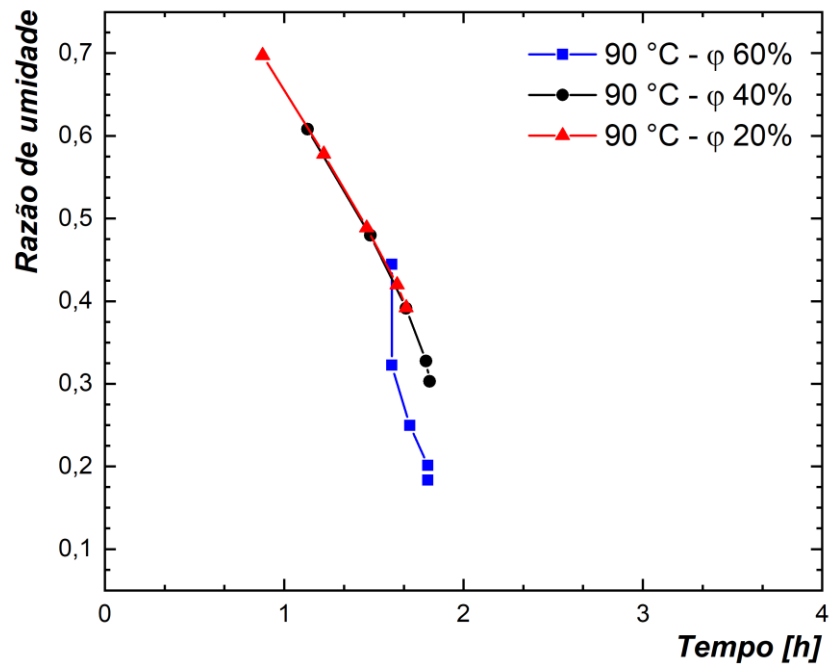
Gráfico 16 – Arroz: secagem a 75°C com variação da umidade relativa do ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o Gráfico 17, para a temperatura do ar de secagem de 90°C, ao reduzir a umidade relativa de 60% para 40%, ocorre redução média de 9% no tempo de secagem. Com a redução da umidade relativa do ar de 60% para 20%, ocorre redução média do tempo de secagem de 20%.

Gráfico 17 – Arroz: secagem a 90°C com variação da umidade relativa do ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

4.4 Secagem de trigo

Foram simulados matematicamente três processos de secagem de trigo, com três temperaturas distintas (60°C, 70°C e 80°C), e variações de umidade relativa (60%, 40% e 20%), considerando uma camada de grãos de altura de 50 cm, fluxo máximo de ar de secagem e densidade do trigo como 800kg/m³.

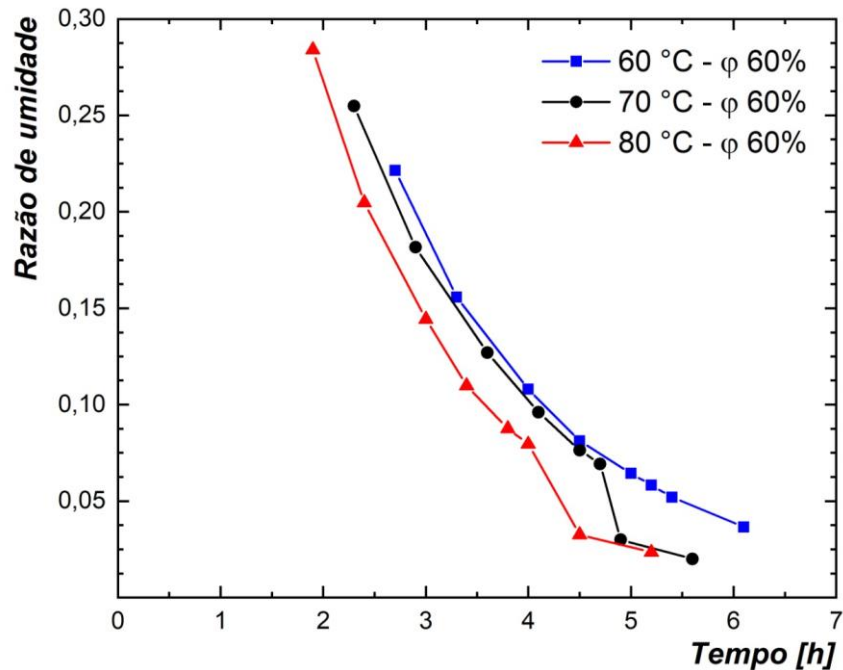
Do mesmo modo que os demais, pode-se perceber que, quanto maior a temperatura de secagem, maior será a razão de umidade. Para a mesma umidade relativa do ar, o aumento da temperatura de secagem de 60°C para 70°C, promove uma redução média de cerca de 11% do tempo de secagem. Ao se trabalhar com a temperatura de secagem de 80°C, há redução média de cerca de 26% do tempo de secagem inicial.

Tabela 11 – Dados de cálculo para secagem de trigo com umidade relativa do ar de 60%.

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura do ar de secagem (°C)	Umidade relativa do ar insuflado (%)	Razão de mistura	Volume específico	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	14	60	60	0,09459	1,216	0,05830	5,2
24	14	60	60	0,09459	1,216	0,06436	5,0
22	14	60	60	0,09459	1,216	0,08125	4,5
20	14	60	60	0,09459	1,216	0,10792	4,0
18	14	60	60	0,09459	1,216	0,15586	3,3
18	13	60	60	0,09459	1,216	0,03663	6,1
17	13	60	60	0,09459	1,216	0,05204	5,4
17	14	60	60	0,09459	1,216	0,22146	2,7
25	14	70	60	0,16185	1,370	0,06928	4,7
24	14	70	60	0,16185	1,370	0,07639	4,5
22	14	70	60	0,16185	1,370	0,09611	4,1
20	14	70	60	0,16185	1,370	0,12698	3,6
18	14	70	60	0,16185	1,370	0,18167	2,9
18	13	70	60	0,16185	1,370	0,00492	9,8
17	13	70	60	0,16185	1,370	0,00690	9,1
17	14	70	60	0,16185	1,370	0,25485	2,3
25	14	80	60	0,28442	1,631	0,07949	4,0
24	14	80	60	0,28442	1,631	0,08755	3,8
22	14	80	60	0,28442	1,631	0,10982	3,4
20	14	80	60	0,28442	1,631	0,14438	3,0
18	14	80	60	0,28442	1,631	0,20481	2,4
18	13	80	60	0,28442	1,631	0,02349	6,0
17	13	80	60	0,28442	1,631	0,03259	5,4
17	14	80	60	0,28442	1,63	0,28408	1,9

Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 18 - Dados de secagem de trigo com umidade relativa do ar de 60%



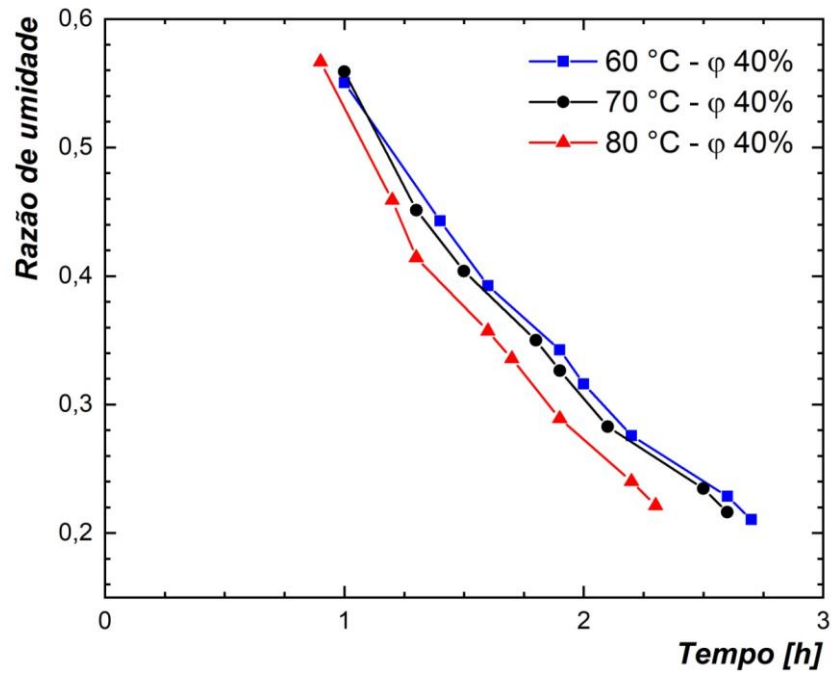
Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme a Tabela 12 e o Gráfico 19, com a redução da umidade relativa do ar de secagem, ao aumentar a temperatura de 60°C para 70°C, percebe-se redução de 5% do tempo de secagem. Quando ocorre o aumento de 60°C para 80°C, o tempo de secagem reduz em 14%.

Tabela 12 – Dados de cálculo para secagem de trigo com umidade relativa do ar de 40%.

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura de secagem (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Razão de mistura	Volume específico	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	14	60	40	0,06002	1,157	0,2104	2,7
24	14	60	40	0,06002	1,157	0,2285	2,6
22	14	60	40	0,06002	1,157	0,2758	2,2
20	14	60	40	0,06002	1,157	0,3425	1,9
18	14	60	40	0,06002	1,157	0,4429	1,4
18	13	60	40	0,06002	1,157	0,3158	2,0
17	13	60	40	0,06002	1,157	0,3926	1,6
17	14	60	40	0,06002	1,157	0,5505	1,0
25	14	70	40	0,09929	1,261	0,2161	2,6
24	14	70	40	0,09929	1,261	0,2345	2,5
22	14	70	40	0,09929	1,261	0,2826	2,1
20	14	70	40	0,09929	1,261	0,3501	1,8
18	14	70	40	0,09929	1,261	0,4513	1,3
18	13	70	40	0,09929	1,261	0,3261	1,9
17	13	70	40	0,09929	1,261	0,4039	1,5
17	14	70	40	0,09929	1,261	0,5589	1,0
25	14	80	40	0,16454	1,415	0,2214	2,3
24	14	80	40	0,16454	1,415	0,2401	2,2
22	14	80	40	0,16454	1,415	0,2889	1,9
20	14	80	40	0,16454	1,415	0,3573	1,6
18	14	80	40	0,16454	1,415	0,4590	1,2
18	13	80	40	0,16454	1,415	0,3356	1,7
17	13	80	40	0,16454	1,415	0,4143	1,3
17	14	80	40	0,16454	1,415	0,5665	0,9

Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 19 - Dados de secagem de trigo com umidade relativa do ar de 40%

Fonte: Autoria própria (2022)

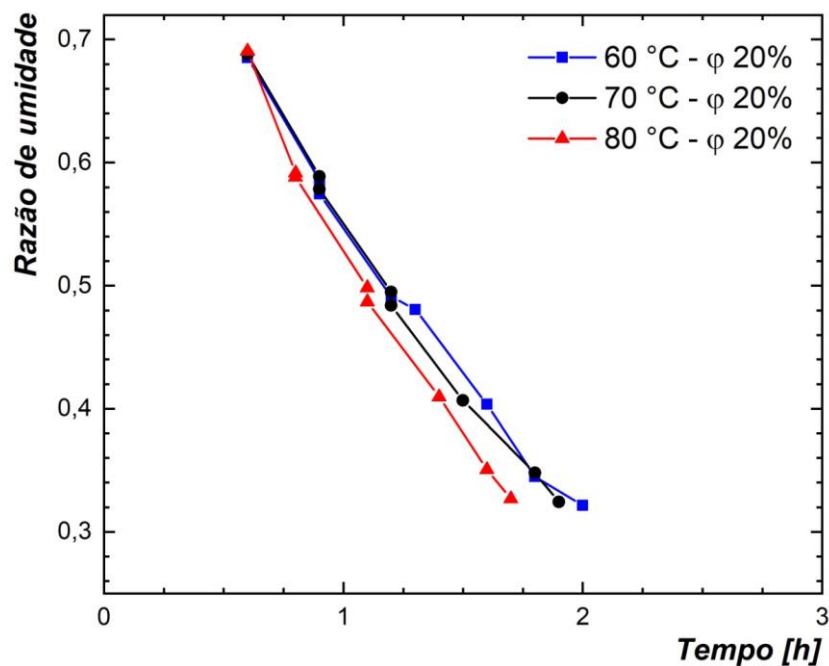
A partir da Tabela 13 e Gráfico 20, com a redução de umidade relativa, o aumento da temperatura de secagem de 60°C para 70°C promove redução do tempo de secagem de 3%. Com o aumento de 60°C para 80°C, o tempo de secagem apresenta redução de 10,5%.

Tabela 13 – Dados de cálculo para secagem de trigo com umidade relativa do ar de 20%.

Umidade inicial (%bu)	Umidade final (%bu)	Temperatura do ar de secagem (°C)	Umidade relativa do ar insuflado (%)	Razão de mistura	Volume específico	Razão de umidade	Tempo de secagem (h)
25	14	60	20	0,02863	1,104	0,32150	2,0
24	14	60	20	0,02863	1,104	0,34490	1,8
22	14	60	20	0,02863	1,104	0,40366	1,6
20	14	60	20	0,02863	1,104	0,48076	1,3
18	14	60	20	0,02863	1,104	0,58561	0,9
18	13	60	20	0,02863	1,104	0,49110	1,2
17	13	60	20	0,02863	1,104	0,57466	0,9
17	14	60	20	0,02863	1,104	0,68524	0,6
25	14	70	20	0,04598	1,168	0,32431	1,9
24	14	70	20	0,04598	1,168	0,34781	1,8
22	14	70	20	0,04598	1,168	0,40677	1,5
20	14	70	20	0,04598	1,168	0,48397	1,2
18	14	70	20	0,04598	1,168	0,58873	0,9
18	13	70	20	0,04598	1,168	0,49494	1,2
17	13	70	20	0,04598	1,168	0,57840	0,9
17	14	70	20	0,04598	1,168	0,68802	0,6
25	14	80	20	0,07266	1,25	0,32693	1,7
24	14	80	20	0,07266	1,25	0,35052	1,6
22	14	80	20	0,07266	1,25	0,40964	1,4
20	14	80	20	0,07266	1,25	0,48695	1,1
18	14	80	20	0,07266	1,25	0,59161	0,8
18	13	80	20	0,07266	1,25	0,49848	1,1
17	13	80	20	0,07266	1,25	0,58185	0,8
17	14	80	20	0,07266	1,25	0,69057	0,6

Fonte: Autoria própria (2022)

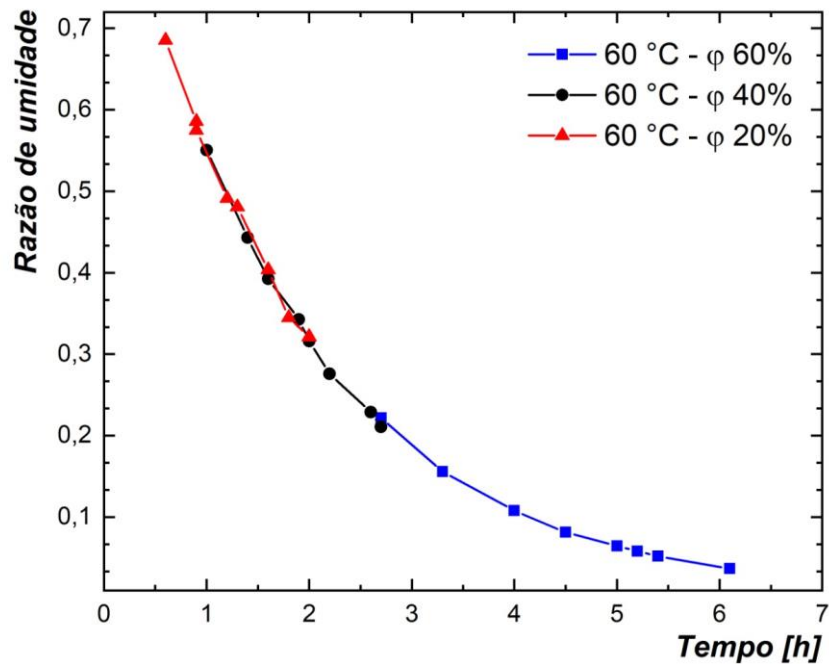
Gráfico 20 - Dados de secagem de trigo com umidade relativa do ar de 20%



Fonte: Autoria própria (2022)

Para o processo de secagem de trigo a 60°C, a redução de umidade relativa do ar, de 60% para 40%, proporciona redução média de 58% do tempo de secagem; ao reduzir a umidade relativa de 60% para 20%, o tempo de processo sofre redução média de 72%.

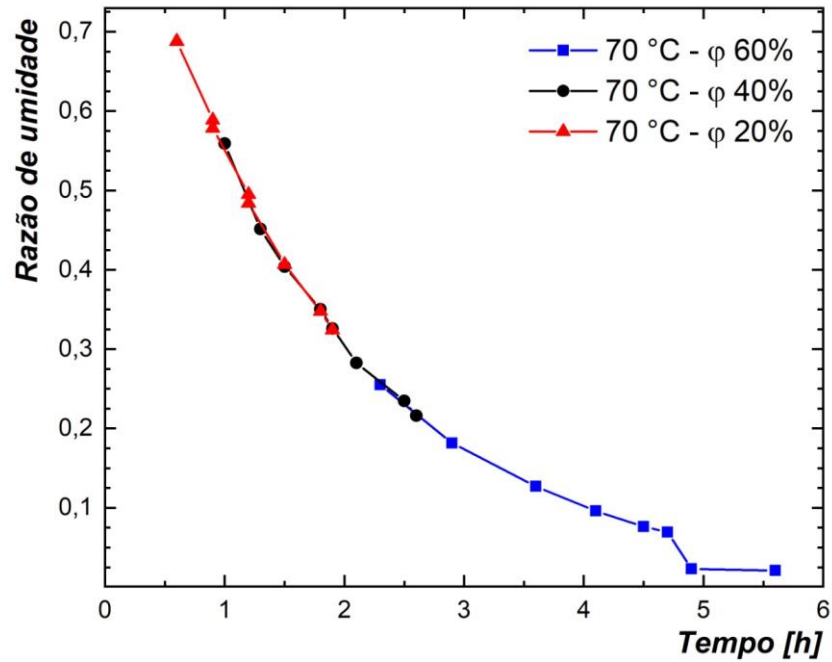
Gráfico 21 – Trigo: secagem a 60°C com variação na umidade relativa do ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

Quando o processo ocorre com ar de secagem a 70°C, conforme o Gráfico 22, ao reduzir o teor de umidade relativa do ar, de 60% para 40%, o tempo de secagem apresenta redução de 55%. Ao considerar a redução de umidade de 60% para 20%, há redução média do tempo de processo de 69%.

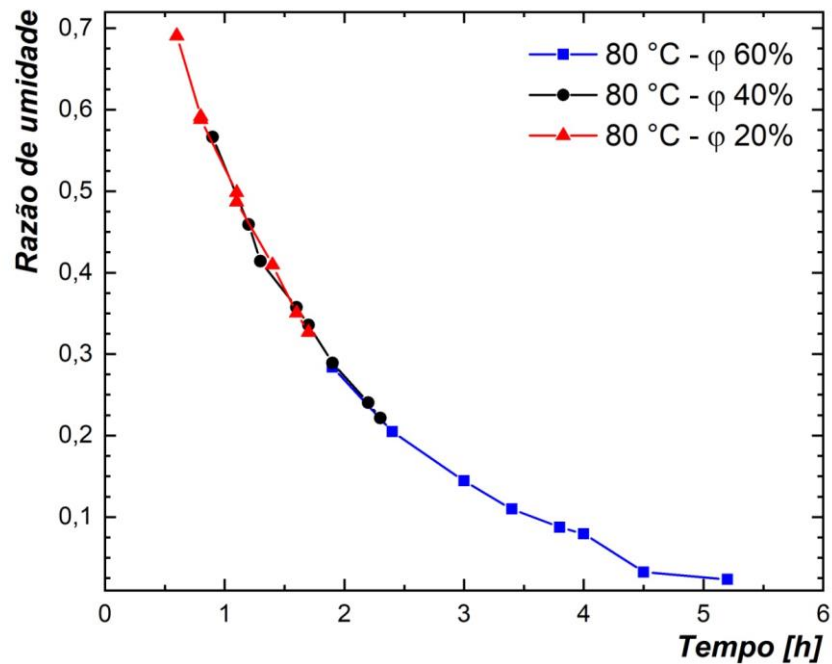
Gráfico 22 – Trigo: secagem a 70°C com variação de umidade relativa do ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o Gráfico 23, para processos com ar de secagem a 80°C, com a redução de umidade relativa do ar de 60% para 40%, observa-se redução média do tempo de secagem em 54%. Ao trabalhar com ar de secagem com umidade relativa de 20%, quando comparado ao processo com 60% de umidade do ar, observa-se redução média de 68% do tempo de secagem.

Gráfico 23 – Trigo: secagem a 80°C com variação da umidade relativa do ar.

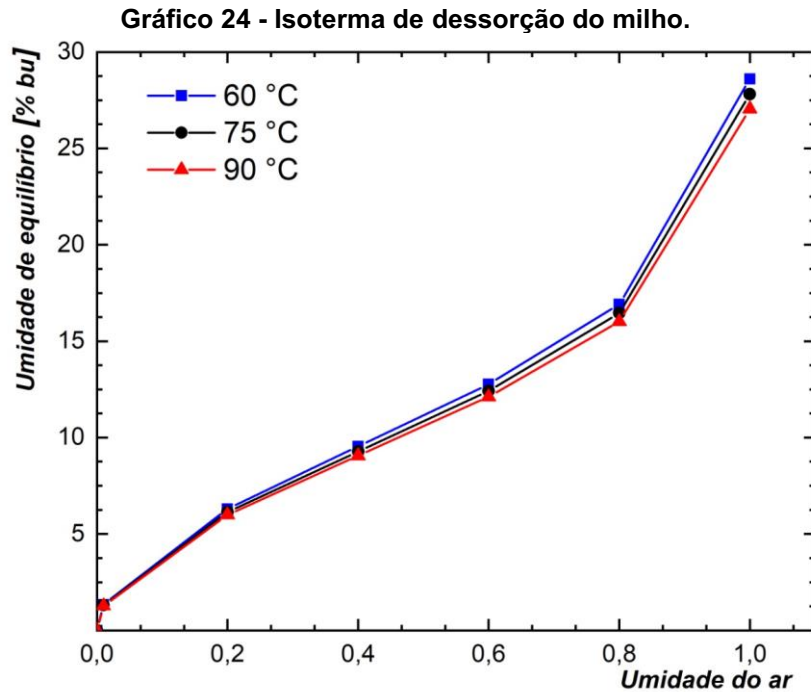


Fonte: Autoria própria (2022)

4.5 Isotermas de sorção

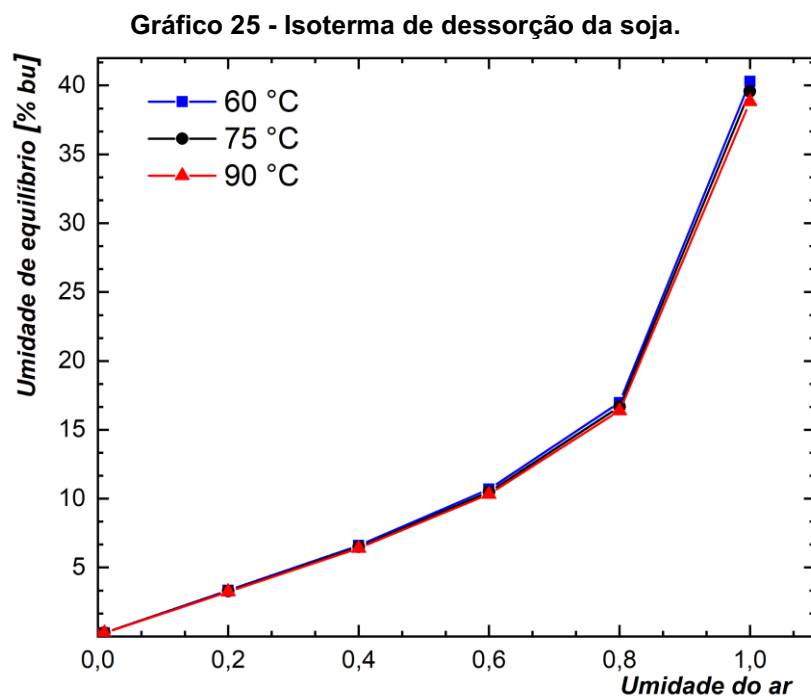
As isotermas de sorção são úteis para prever a estabilidade de alimentos em diferentes condições atmosféricas (de temperatura e umidade). No presente trabalho, as isotermas de sorção demonstram a relação entre o teor de umidade de equilíbrio do grão com a umidade relativa do ar, em diferentes condições de temperatura.

A isoterma de dessorção do milho, Gráfico 24, se comporta como um sigmóide, sendo assim, uma isoterma do tipo II. É possível perceber uma mudança no comportamento em 0,2 e 0,8 de umidade relativa do ar; no primeiro caso, ocorre o enchimento dos poros pequenos, e, em 0,8, ocorre o enchimento dos poros grandes, dilatando o material.



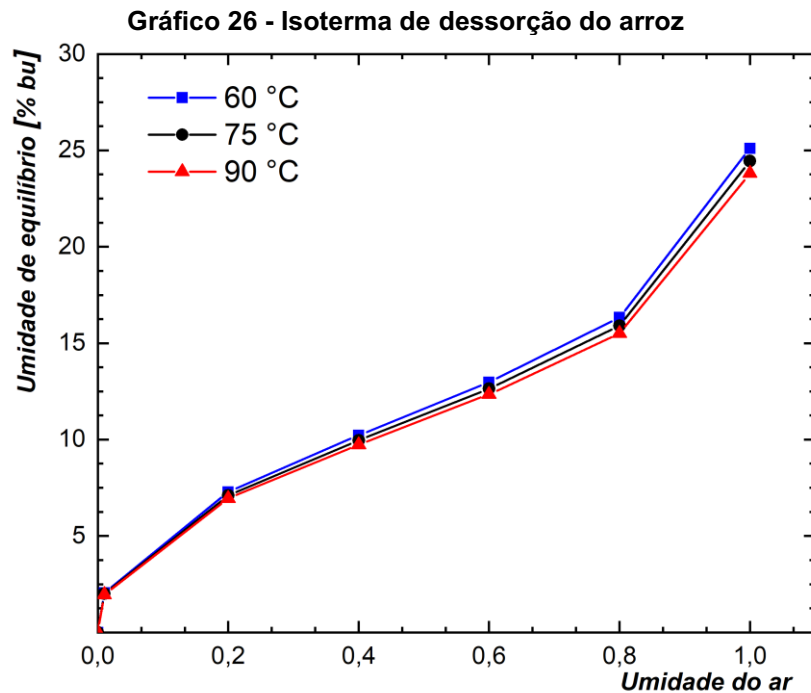
Fonte: Autoria própria (2022)

A isoterma de dessorção da soja, representada no Gráfico 25, é uma isoterma do tipo III, se comportando como um “J”. Entre 0 a 0,6 de umidade relativa, o aumento do teor de umidade é relativamente baixo, ponto onde os cristais presentes na composição do grão começam a se dissolver, acelerando, então, o ganho de umidade.



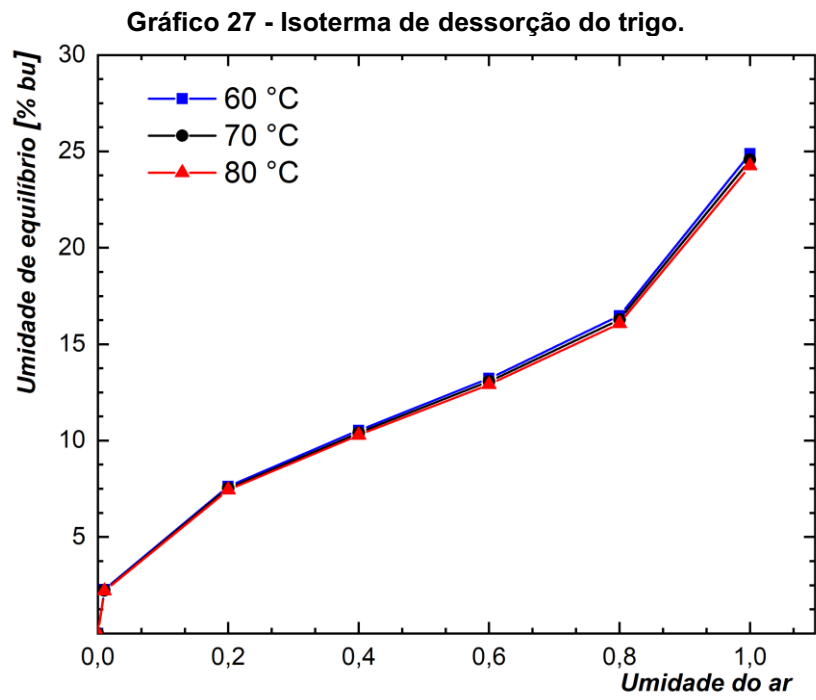
Fonte: Autoria própria (2022)

Assim como o milho, o arroz apresenta isoterma sigmóide (do tipo II), com um ganho de umidade um pouco maior que o milho. Da mesma forma, em 0,2, inicia-se o processo de enchimento dos pequenos poros, e, em 0,8, dos poros maiores, promovendo a dilatação do grão. A isoterma de dessecção do arroz encontra-se no Gráfico 26.



Fonte: Autoria própria (2022)

O trigo, assim como o milho e o arroz, apresenta isoterma tipo II. Em 0,2 ocorre enchimento dos pequenos poros da massa de grãos, e, em 0,8, o enchimento dos grandes poros. Uma questão característica que difere o trigo dos demais grãos são as curvas sobrepostas, como é possível observar no gráfico acima. A isoterma de dessecção do trigo é representada no Gráfico 27.



Fonte: Autoria própria (2022)

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

No presente Trabalho de Conclusão de Curso, foi realizado um estudo matemático acerca da influência das propriedades termohigrométricas do ar no tempo de secagem de alguns grãos.

Com o estudo realizado, foi possível concluir que, o aumento de temperatura favorece o decaimento do tempo de secagem de todos os grãos analisados, sendo mais acentuado em grãos de milho, devido à sua porosidade, que facilita o escoamento do ar de secagem por entre os grãos.

Os grãos de soja, como apresentam característica hidrofóbica devido aos lipídeos em sua composição, apresentam intensa desidratação quando submetidos a teores de umidade relativa iguais ou menores a 40%, retornando teores de umidade menores que os comerciais, inviabilizando o processo.

Os grãos de arroz apresentam menor influência do aumento da temperatura de secagem, pois são os grãos com maior valor de porosidade, dificultando o escoamento do ar por seu entorno. O mesmo ocorre com a diminuição da umidade relativa do ar.

O trigo apresenta pouca influência quanto à temperatura do ar de secagem; já, com relação à diminuição da umidade relativa do ar, seu comportamento assemelha-se aos grãos de milho, provavelmente devido a sua porosidade e composição química, que são muito semelhantes.

De modo geral, os processos a temperaturas mais baixas sofrem maior influência da redução de umidade relativa do ar, validando o fato de que não há necessidade de controlar a umidade relativa do ar em processos de secagem a altas temperaturas.

O processo de secagem com controle das propriedades termohigrométricas do ar apresenta-se, de forma promissora, como uma opção para secagem de grãos destinados a sementes. A secagem com temperaturas mais baixas e ar mais seco, resulta em grãos de maior integridade fisiológica, garantindo boas taxas germinativas. Da mesma forma, é um processo viável ao se pensar nos requisitos de garantia de qualidade e segurança alimentar de grãos comercializados.

Por fim, os grãos apresentaram comportamentos esperados em suas isotermas de dessorção, validando a modelagem matemática utilizada.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Dessa forma, como sugestões para trabalhos futuros, têm-se:

- a. Projetar um protótipo de secador com sistema de tratamento de ar para secagem em leito fixo com camada espessa;
- b. Realizar um estudo experimental da secagem desses grãos, comparando os dados obtidos com a modelagem matemática;
- c. Realizar um estudo experimental do comportamento do feijão durante o processo de secagem, e construir uma modelagem matemática adequada para o grão;
- d. Avaliar a redução do tempo de secagem de grãos em temperaturas inferiores a 60°C, com diferentes valores de umidade relativa do ar;
- e. Promover um estudo para quantificar a redução de custos de secagem ao adotar o sistema de pré-tratamento do ar de secagem.
- f. Realizar um estudo experimental da secagem de milho, e, propor uma modelagem matemática com polinômio de terceira ordem, assim como os demais grãos apresentam.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, C. A. **Determinação da Quantidade de Água Condensada nos Evaporadores de Sistemas de Ar Condicionado**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2016.
- CARVALHO, N. M. **A secagem de sementes**. 1. ed. Jabotical: Funep, 2005.
- COSTA, E. C. **Secagem industrial**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre, AMGH, 2013.
- DIAS, E. D. **Metodologia de cálculo da capacidade de secagem dos secadores de coluna**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2015.
- ESTADÃO – Canal Agro. Quais são os principais produtores de grãos do mundo? 27 mai. 2022. Disponível em: <https://summitagro.estadao.com.br/comercio-exterior/quais-sao-os-principais-produtores-de-graos-do-mundo/>. Acesso em: 01 jun. 2022.
- FERRARI, F. E. **Métodos e temperaturas de secagem sobre a qualidade físico-química e microbiológica de grãos de milho no armazenamento**. 2011. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia com Ênfase Horticultura) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- LORINI, I. et al. **Manejo integrado de pragas de grãos e sementes armazenadas**. 1. ed. Londrina, Embrapa, 2015.
- MATA, M. E. R. M. C. et al. Programa computacional para simulação de secagem de grãos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.1, n.1, p.33-50, 1999.
- NETO, J. J. S. B. et al. **Sementes: estudos tecnológicos**. Aracaju, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe. 2014.
- OLIVEIRA, R. S. **Metodologia para Caracterização do Desempenho de Unidades de Ar Condicionado tipo Janela**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.
- SILVA, J. S. et al. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2008.
- SIMÕES-MOREIRA, J. R.; NETO, A. H. **Fundamentos e aplicações da psicrometria**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2019.
- SOUSA, R. V. **Secagem em camada fina e espessa de grãos de arroz vermelho em casca: avaliação experimental, modelagem e simulação**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

THOMPSON, T. L. et al. Mathematical simulation of corn drying – a new model. **The Transactions of the America Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.

TOLENTINO, E. L. **Análise energética e exergética da secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando o método dos volumes finitos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

TORRES, M. A. P. **Desempenho de diferentes métodos de secagem e seus efeitos sobre a qualidade fisiológica de sementes de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)**. 2006. Dissertação (Mestrado em Plantas Forrageiras) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TUNNERMANN, H. **Metodologia para desenvolvimento de um equipamento para secagem da vagem verde de soja e seus resíduos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Projetos e Processos de Fabricação) - Programa de Pós-Graduação em Projetos e Processos de Fabricação, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2018.

ZEYMER, J. S. **Modelagem matemática dos fenômenos de higroscopia e respiração de grãos de soja em diferentes condições de armazenamento**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.