



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Estudo de caso da influência da altura da camada no processo de secagem de malte

*Autor: Eduarda Moreira Cappellari*

*Orientadores: Márcio Schwaab*

*Débora Jung Luvizetto Faccin*

Porto Alegre, fevereiro de 2024



Autor: Eduarda Moreira Cappellari

## Estudo de caso da influência da altura da camada no processo de secagem de malte

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química*

Márcio Schwaab e Débora Jung Luvizetto Faccin

Banca Examinadora:

Professor Evandro Steffani, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Professora Aline Cassini, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2024

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, minha mãe Patrícia e meu pai Paulo Henrique por todo o suporte fornecido nestes anos de graduação, por serem a minha base e sempre se dedicarem ao máximo na minha educação e em formar a pessoa que sou hoje.

Agradeço também a todo o corpo docente da Escola de Engenharia, que me auxiliou durante essa trajetória, em especial aos professores e orientadores Márcio e Débora, por todo o suporte fornecido desde o início deste trabalho.

Aos colegas ao longo do curso, agradeço pelo apoio, parceria e amizade durante essa jornada, levarei com muito carinho um pedacinho de cada um em minha vida. Em especial minha amiga Cássia, minha dupla que me acompanhou do início ao final dessa trajetória e seguirá me acompanhando depois dela.

Aos líderes e colegas de trabalho, meu agradecimento pelo apoio na realização deste trabalho e principalmente, pelos ensinamentos e desafios diários que enfrentamos juntos. Todos me incentivaram e direcionaram a me descobrir como profissional e amar todos os dias o que eu faço.

Por fim, agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Departamento de Engenharia Química pelo ensino público e de qualidade. A Eduarda que sou hoje só existe por tudo que passei neste período.

Muito obrigada!

## RESUMO

O setor cervejeiro desempenha um papel significativo na economia brasileira, representando aproximadamente 15% da indústria de transformação do país. O malte, principal matéria-prima da cerveja, passa por três etapas de processo essenciais: maceração, germinação e secagem. Sendo a secagem a etapa de maior oportunidade no assunto de produtividade, com a padronização e otimização da altura da camada de malte carregada para a secadora, a busca por melhorias de processo que levem a economia de tempo e recursos é um campo de grande interesse econômico. Nesse contexto, foi realizado um estudo de caso em uma maltaria do estado do RS, com capacidade de produção de aproximadamente 130.000 toneladas de malte por ano. Através do desenvolvimento de uma ferramenta de *Machine Learning*, foi possível realizar uma predição do tempo de secagem de acordo com os dados alimentados e acumulados nas etapas anteriores. Assim, é possível determinar uma altura de camada de carregamento ideal para que o processo seja o mais otimizado possível, sem impactar de forma negativa a qualidade do malte. Este é apenas um estudo inicial que busca um primeiro passo para o uso de inteligência artificial a favor de melhorias na indústria, sendo trabalhado para que o método seja desenvolvido e o estudo evolua para que os resultados possam ser ainda mais impactantes e certos, tanto no processo de secagem, quanto todos os outros que existem dentro da maltaria.

**Palavras-chave:** malte, secagem de grãos, altura de camada, inteligência artificial, tempo de secagem.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenho esquemático da estrutura dos equipamentos da etapa de maceração, identificando os exaustores de gases e o tanque de maceração. ....	4
Figura 2: Desenho esquemático do equipamento utilizado na germinação do malte, identificando o sentido de fluxo do ar e o leito de malte germinado. ....	5
Figura 3: Crescimento da radícula durante o processo de germinação da cevada em condições controladas de tempo, temperatura e umidade. ....	6
Figura 4: Desenho esquemático de um secador de leito fixo utilizado tipicamente no processo de secagem de malte, retratando o sentido de deslocamento do ar de secagem através do leito de grãos. ....	7
Figura 5: Tipos de secagem. ....	10
Figura 6: Curva de secagem padrão. ....	18
Figura 7: Planilha de dados de processo. ....	22
Figura 8: Importância das principais variáveis. ....	27
Figura 9: Gráfico de dispersão dos testes. ....	28
Figura 10: Parte exemplo do programa realizado em PyCharm para a realização da predição .....	29
Figura 11: Resultado da predição do tempo de secagem .....	30
Figura 11: Código de predição da altura de camada ideal .....	30

## SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	Processo de Malteio	2
2.1.1	Maceração	3
2.1.2	Germinação	4
2.1.3	Secagem	6
2.2	Importância do Processo de Secagem	7
2.4	<i>Modelos de Secagem e Secadoras</i>	9
2.4.1	Secador de Leito Fixo	11
2.4.2	Secagem de Camada Fina	13
2.4.3	Secagem de Camada Espessa	14
3	Materiais e Métodos	17
3.1	Descrição do Processo	17
3.2	Metodologia Aplicada	19
3.2.1	Inteligência Artificial	19
3.2.2	Método de Regressão Linear	20
3.2.3	Treinamento do Programa	21
4	Resultados e Discussões	25
4.1	Avaliação do Problema	25
4.2	Avaliação das Variáveis	26
4.3	Treinamento do Programa	28
4.4	Resultados de Predição	29
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	31



## 1 Introdução

O consumo de cerveja no Brasil tem se destacado cada vez mais no cenário mundial, tendo sido o terceiro maior no consumo global de aproximadamente 250 bilhões de litros em 2015, de acordo com a revista *The Economist* (2017). Em 2016, o mercado cervejeiro representou 1,6% do Produto Interno Bruto do Brasil, gerando oportunidades de emprego para cerca de 2,2 milhões de pessoas, tanto de forma direta quanto indireta, conforme dados da CERVBASIL (2017).

Com 679 cervejarias instaladas no país, o Estado do Rio Grande do Sul se destaca como líder, abrigando aproximadamente 21% desses estabelecimentos (MÜLLER et al., 2017). No entanto, para garantir a capacidade de produção do setor cervejeiro, é essencial assegurar a disponibilidade da matéria-prima. Entre os insumos fundamentais, destaca-se o grão de malte, derivado do processamento bioquímico do grão de cevada, conforme descrito por KUNZE (2014). O malte não apenas confere cor e densidade à cerveja, mas também é responsável pelo aroma e sabor do produto final. Em média, são utilizados cerca de 200 gramas de malte para fabricar 1 litro de cerveja, considerando o rendimento do processo conforme informações da MALTEUROP (2017).

A fim de suprir a demanda nacional de produção de malte, estimada em 1,3 milhões de toneladas, o país precisa recorrer à importação de aproximadamente 400 mil toneladas, o que resulta em custos adicionais para o país (PORPINO, 2016). O processo produtivo de malte ocorre em maltarias e envolve etapas importantes, como a maceração, a germinação e a secagem, que serão objeto de estudo no presente trabalho. A malteação baseia-se na germinação parcial dos grãos de cevada, ativada por enzimas, que atuam nas reservas energéticas, convertendo o amido e as proteínas em cadeias carbônicas reduzidas. Essa transformação é essencial para a obtenção posterior de etanol no processo cervejeiro (KUNZE, 2014).

A dependência de importações de malte evidencia a necessidade de aprimorar e otimizar o processo de malteação no país, a fim de aumentar a produção nacional e reduzir os custos associados às importações. Ao compreender as etapas fundamentais da malteação e buscar formas de aperfeiçoamento, é possível fortalecer

a indústria cervejeira brasileira, garantindo a disponibilidade adequada de malte e impulsionando o setor a atender à crescente demanda nacional e internacional de cerveja de qualidade.

No contexto da relevância do processo produtivo de malte, o presente trabalho aborda um estudo de caso em uma maltaria situada no Estado do Rio Grande do Sul. O objetivo central é desenvolver uma metodologia para otimizar o processo de malteação por meio de uma ferramenta de predição. Nesse sentido, o sistema proposto é fundamentado em uma abordagem de inteligência artificial, utilizando um modelo de regressão linear.

A utilização de inteligência artificial como base para o sistema de predição permite analisar e aprender a partir de dados históricos, identificando padrões e relacionamentos complexos. Com base nesses *insights*, o sistema é capaz de fazer predições sobre variáveis relevantes para o processo de malteação, auxiliando na tomada de decisões e no planejamento eficiente do processo.

Ao aplicar essa abordagem de inteligência artificial na otimização da malteação, espera-se melhorar a eficiência, a produtividade e a qualidade do produto final. Além disso, abre-se espaço para futuros aprimoramentos e contribuições no campo da engenharia, aproveitando o potencial das redes neurais artificiais e outras técnicas de inteligência artificial para impulsionar a indústria de malteação como um todo.

## **2 Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Processo de Malteio**

O malte usado nas cervejarias é produzido a partir de variedades de cevada escolhidas exclusivamente para esse fim. A cevada é uma planta pertencente à família das gramíneas, semelhante ao trigo, e é cultivada em regiões de clima temperado. No Brasil, a produção de cevada ocorre em algumas áreas específicas do Rio Grande do Sul durante o inverno. Já na América do Sul, a Argentina se destaca como a principal produtora de cevada (JUNIOR; VIEIRA; FERREIRA, 2009).

Após a colheita da safra, os grãos de cevada são armazenados em silos, com temperatura e umidade controladas, aguardando o envio para a maltaria, onde ocorrerá a transformação em malte. O processo consiste em criar condições favoráveis para a germinação dos grãos de cevada, interrompendo-a assim que a nova planta começar a se desenvolver. Nessa fase, o amido do grão se apresenta em cadeias menores em comparação à cevada, tornando-se mais solúvel e menos rígido. No interior do grão, formam-se enzimas essenciais para a fabricação de cerveja (JUNIOR; VIEIRA; FERREIRA, 2009).

A germinação é interrompida por meio de secagem controlada, em temperaturas que reduzem a umidade sem prejudicar as enzimas formadas.

O malte é o resultado da germinação controlada do grão de cevada, onde ocorre o desenvolvimento de enzimas e modificações no amido para torná-lo mais macio e solúvel. Nesse processo, utiliza-se apenas as forças naturais, aproveitando a capacidade das sementes de germinar e se desenvolver em uma nova planta. O papel do homem nesse processo é controlar as condições de temperatura, umidade e aeração do grão (JUNIOR; VIEIRA; FERREIRA, 2009).

É crucial compreender e controlar essas variáveis durante o processo de malteação, juntamente com a realização de análises preliminares da matéria-prima, para garantir a produção de um produto final de alta qualidade (PRIEST E STEWART, 2006).

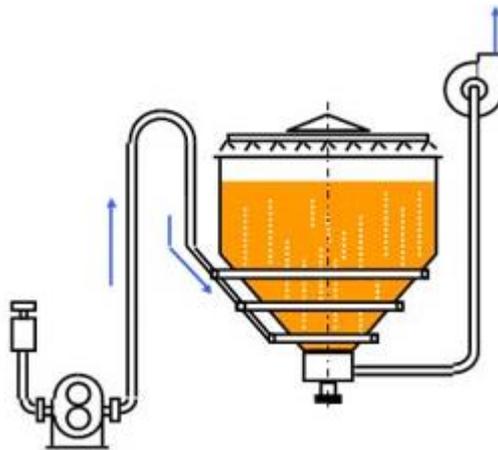
### *2.1.1 Maceração*

A maceração é um processo realizado com o objetivo de aumentar o teor de umidade (água) nos grãos, por meio de procedimentos de imersão. A duração dos períodos de repouso e submersão reflete requisitos específicos, como a disponibilidade de água e o ciclo de produção. Cada etapa de imersão pode demandar aproximadamente 900 litros (200 galões) de água por tonelada de cevada. No entanto, é importante ressaltar que a maceração pode limitar a modificação do endosperma e afetar negativamente a qualidade do malte. A fim de alcançar níveis ideais de hidratação, recomenda-se adicionar aproximadamente 5% de água antes do início do processo de germinação. (PRIEST E STEWART, 2006)

A maceração é geralmente realizada em tanques, com aeração proporcionada por aeradores. O fornecimento de oxigênio nesse estágio é vital para estimular o desenvolvimento do embrião nos grãos (KUNZE, 2004).

A presença de oxigênio dissolvido na água é importante para evitar condições anaeróbias durante a maceração, que poderiam favorecer a fermentação indesejada. A falta de oxigênio pode levar à formação de odores lácticos e até mesmo à morte dos grãos. Portanto, a aeração adequada é essencial para garantir um ambiente saudável para os grãos em maceração (HOUGH, 1982).

Durante a maceração, são realizados ciclos intercalados de períodos secos e submersos para homogeneizar o teor de água na massa de grãos. Para os períodos secos, é necessário o uso de equipamentos de sucção para remover o dióxido de carbono liberado pela respiração dos grãos e tornar o ambiente propício para seu desenvolvimento saudável (PINHEIRO, 2016). Na Figura 1, podemos observar o desenho esquemático de um funil de maceração, exemplificando os grãos submersos e as correntes de ar.



**Figura 1** - Desenho esquemático da estrutura dos equipamentos da etapa de maceração, identificando os exaustores de gases e o tanque de maceração (Maltear, 2009).

### 2.1.2 Germinação

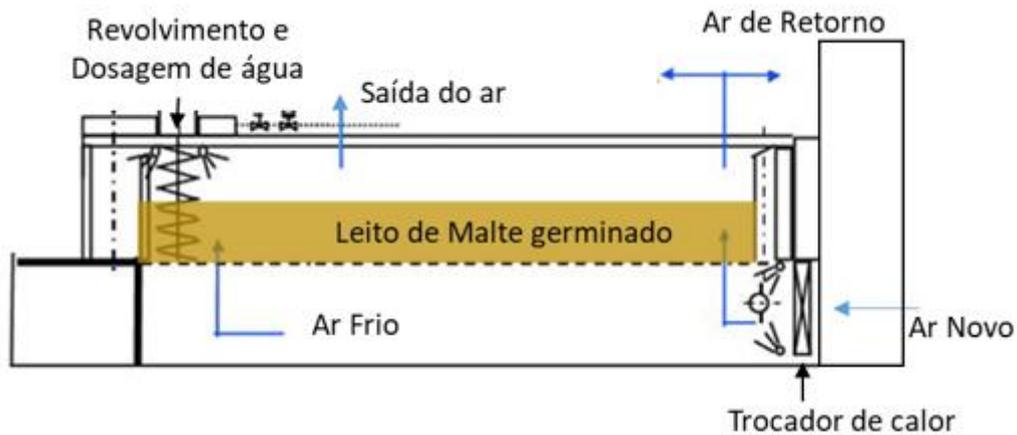
A etapa de germinação, em seguida, depende diretamente da maceração. Nessa fase, ocorre o desenvolvimento do grão por meio das atividades enzimáticas iniciadas na maceração. O consumo do endosperma (amido e aminoácidos) durante

a germinação afeta diretamente o rendimento do malte e, conseqüentemente, o processo de produção de cerveja (PINHEIRO, 2006).

A germinação é um processo biológico no qual ocorre a liberação de ácido giberélico e a produção de giberelinas, que estimulam a síntese de enzimas solúveis em água nas primeiras 48 horas. Além do desenvolvimento natural, é possível adicionar ácido giberélico no início do processo, juntamente com água, para acelerar e aprimorar a germinação, tornando-a mais eficiente (KUNZE, 2004)

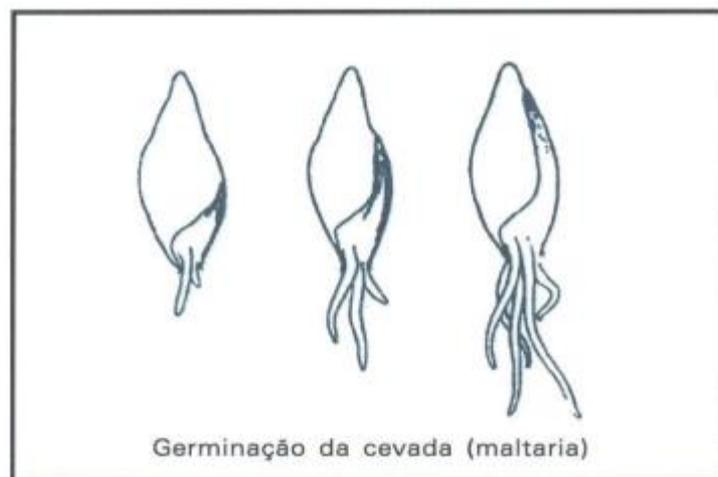
Os principais parâmetros controlados durante a germinação são a temperatura e a ventilação do leito de grãos. O ar, impulsionado por compressores, passa pela massa de grãos de forma ascendente, removendo o calor gerado pelo metabolismo dos grãos. A temperatura de controle da germinação deve ser mantida no intervalo entre 16 e 20 °C. É importante controlar esse parâmetro, pois temperaturas muito baixas podem inibir o metabolismo dos grãos, enquanto temperaturas muito altas aceleram demais o processo e podem danificar o endosperma (WEST, 2020)

Existem dois tipos comuns de germinadores: os germinadores circulares e os do tipo saladin. No estudo em questão, são utilizados germinadores do tipo saladin, que são caixas retangulares com aproximadamente 50 metros de comprimento, 3 metros de largura e leito de grãos com altura de 1 a 2 metros, conforme a Figura 2. Dentro desses germinadores, há um sistema de transmissão que movimenta helicoides, responsáveis por homogeneizar o leito e evitar que a camada fique agregada devido ao desenvolvimento das raízes durante a germinação. Ao longo dos anos, foram feitas algumas adaptações no projeto original desses germinadores.



**Figura 2** - Desenho esquemático do equipamento utilizado na germinação do malte, identificando o sentido de fluxo do ar e o leito de malte germinado (Adaptado de Maltear, 2009)

O acompanhamento do processo se dá por observação do crescimento do embrião, o cheiro e a textura dos grãos, como mostra a Figura 3. Geralmente, o malteiro interrompe essa etapa quando a parte inicial do embrião (radícula e três quartos da acrospira) representa cerca de dois terços do comprimento do grão. Essa medida visual ajuda a determinar o momento certo para encerrar a germinação e avançar para as próximas etapas do processo de malteação (AQUARONE, 2001).

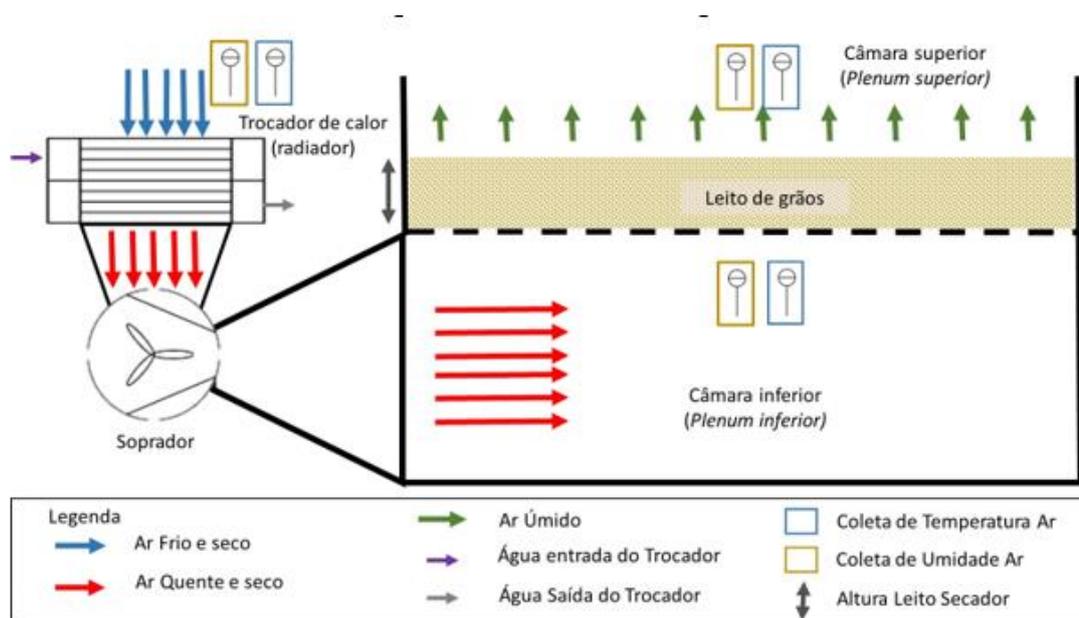


**Figura 3** - Crescimento da radícula durante o processo de germinação da cevada em condições controladas de tempo, temperatura e umidade. (TSCHOPE; NOHEL, 1999)

O processo de germinação tem duração aproximada de 80 horas. Ao final, o produto com umidade entre 40% e 45% é levado para a etapa de secagem. Durante o processo, são utilizados indicadores como análise de umidade e observação visual do crescimento dos brotos e raízes dos grãos. Esses indicadores permitem avaliar o progresso da germinação ao longo do tempo, garantindo que os grãos atinjam o estágio adequado antes de prosseguir para a secagem (PINHEIRO, 2006).

### 2.1.3 Secagem

O processo de germinação é interrompido quando os grãos de malte são secos. Isso é feito nos equipamentos chamados "secadores". Assim como os germinadores, esses secadores, Figura 4, possuem um fundo falso perfurado onde o malte é colocado. O ar usado para secagem é quente e seco, e passa pelo leito de malte em fluxo ascendente ou descendente (AQUARONE et al., 2001).



**Figura 4** - Desenho esquemático de um secador de leito fixo utilizado tipicamente no processo de secagem de malte, retratando o sentido de deslocamento do ar de secagem através do leito de grãos (AMBEV)

Durante o processo de secagem do malte, existem três etapas distintas. Na primeira etapa, o ar quente com temperatura de 49-60°C é usado para remover a água livre dos grãos, reduzindo a umidade do malte de 48% para cerca de 23%. Na segunda etapa, a remoção da umidade é mais lenta. O fluxo de ar é reduzido e a temperatura

é aumentada para aproximadamente 71°C. No final dessa etapa, o malte atinge uma umidade de 12%. Na etapa final de secagem, a eliminação da água é ainda mais lenta e desafiadora. Novamente, o fluxo de ar é reduzido e a temperatura é elevada, desta vez chegando a até 88°C. É nessa fase que o sabor “verde” é eliminado e a maior parte do sabor característico do malte é incorporada aos grãos (AQUARONE et al., 2001).

## **2.2 Importância do processo de secagem**

Ao retomar o conhecimento dos capítulos anteriores, é possível observar que etapa final do processo de malteação consiste na secagem do malte. Nessa fase, busca-se estabelecer as características desejadas e a qualidade final do produto, reduzindo a umidade do malte verde de 45% para 5%. Esse processo é crucial para conferir ao malte características estáveis e adequadas para o armazenamento.

Os principais objetivos da etapa de secagem são interromper as reações bioquímicas que ocorrem dentro do grão durante a germinação e fixar as características desejadas do malte. Ao controlar cuidadosamente a temperatura e o tempo de secagem, é possível preservar as propriedades desejadas, como cor, sabor, aroma e atividade enzimática (Warpala & Pandiella, 2000).

Durante a secagem do malte, ocorrem diversos efeitos adicionais, como a interrupção do crescimento da plântula e modificações no malte, inativação do sistema enzimático, preservação das enzimas, desenvolvimento e estabilização das características de aroma desejadas, remoção de aromas indesejáveis e secagem das radículas para facilitar sua remoção (EBC, 2000).

A remoção de água durante o processo de secagem ocorre devido à passagem de ar quente através dos grãos. A taxa de remoção de água é influenciada principalmente por dois parâmetros: a velocidade e a temperatura do ar que atravessa a camada de grãos. Quanto maior a velocidade do ar e mais alta a temperatura, mais rápida será a remoção de água dos grãos durante a secagem. Esses parâmetros são cuidadosamente controlados para garantir uma secagem eficiente e adequada dos grãos de malte (BRIGGS, 2012).

O processo de secagem deve ser realizado com cuidado, pois é necessário reduzir a umidade sem danificar as enzimas formadas nas etapas anteriores do

processo de malteação. Para isso, o malte é aquecido gradualmente, utilizando altas vazões de ar, o que ajuda a proteger as enzimas sensíveis ao calor em altas umidades. Somente após uma considerável redução da umidade, em torno de 10%, é viável aumentar a temperatura de secagem para desenvolver o aroma e sabor característicos do malte. É importante seguir esse processo gradual para preservar as propriedades enzimáticas e obter um malte de qualidade (Lewis & Young, 1995).

No último estágio da secagem, após o aumento da temperatura, ocorrem transformações bioquímicas adicionais no grão. Isso inclui a redução do pH devido à presença de enxofre, a solubilização de polifenóis e antocianinas, a diminuição da solubilização de proteínas e a degradação do precursor do DMS, um composto indesejável na cerveja.

Nesse momento, conhecido como período de cura, ocorre o desenvolvimento da cor e do aroma do malte. Além disso, ocorrem as reações de Maillard, que são fenômenos diretamente relacionados à temperatura da etapa final de secagem (Cabral & Cordeiro, 2004).

### **2.3 Modelos de secagem e secadoras**

Para garantir a viabilidade econômica do processo de secagem, é essencial conduzir uma avaliação abrangente que leve em consideração a efetividade do equipamento utilizado, o tempo necessário para a secagem e as características qualitativas do produto final. Em relação ao equipamento, é importante verificar sua eficiência energética, capacidade de secagem, controle de temperatura e umidade, e sua durabilidade. Um equipamento adequado e eficiente pode reduzir custos operacionais e garantir um processo de secagem mais rápido e eficaz. Realizar um levantamento completo desses aspectos permitirá avaliar a viabilidade econômica do processo de secagem, otimizar os recursos utilizados e garantir a produção de um produto final de alta qualidade. (CHEN et al., 2008). Na Figura 5, encontra-se um esquema dos diferentes tipos de secagem e algumas características.

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

**Figura 5** – Tipos de secagem (Portella, et al. (2001).

O esquema apresentado na Figura 5 destaca a diferença entre a secagem natural e a secagem artificial. Na secagem natural, não há intervenção humana e o processo ocorre naturalmente no campo, dependendo das condições ambientais, como temperatura, umidade e ventos. Por outro lado, na secagem artificial, pode-se utilizar métodos mecânicos ou manuais para acelerar o processo.

Na ventilação artificial, é possível utilizar a ventilação natural, aproveitando a ação dos ventos, mas com o auxílio de ventiladores ou correntes convectivas para aumentar o fluxo de ar. Além disso, na secagem artificial, é possível trabalhar com diferentes temperaturas controladas e até mesmo utilizar sistemas modulares para otimizar o processo.

A secagem forçada é um exemplo de secagem artificial amplamente utilizada na indústria, especialmente na secagem de grãos. Nesse processo, são empregados ventiladores ou sopradores para criar um fluxo de ar intenso que acelera a remoção da umidade dos grãos.

Essas diferentes abordagens permitem adaptar o processo de secagem às necessidades específicas, levando em consideração fatores como o tipo de produto,

a quantidade a ser processada e as condições ambientais disponíveis (Portella, et al. (2001).

De acordo com Carvalho (1994), a secagem com ar aquecido é o método mais adequado para o processo de secagem de grãos. Nesse método, a transferência de calor ocorre inicialmente por convecção entre o ar de secagem e a superfície do grão, seguida pela difusão no interior do cereal. Simultaneamente há formação de vapor e transferência de massa por difusão ou convecção (ou ambos) nos canais porosos do material.

O processo envolve a passagem contracorrente de ar seco, com baixo teor de umidade, através de um leito de grãos. A camada de ar próxima ao produto está em equilíbrio com o grão, permitindo que a água presente na camada limite seja removida, saturando a corrente de ar de secagem que sai do ambiente. Conforme a umidade é perdida, é necessário fornecer calor de evaporação para compensar o calor transferido para a superfície do produto, a fim de alcançar um novo equilíbrio.

O método de secagem com ar não saturado e aquecido é eficiente para a remoção de umidade dos grãos, proporcionando um processo controlado e adequado para a obtenção de produtos secos de qualidade (SMITH & HUY, 2008).

### *2.3.1 Secador de leito fixo*

Segundo Fugamalli (2007), o secador de leito fixo é um tipo de secador amplamente utilizado em regiões agrícolas para a secagem de grãos, como uma etapa essencial para o armazenamento eficiente e duradouro. Esse tipo de secador é conhecido por ser de baixo custo, fácil construção e operação simples, o que o torna acessível e viável para muitos produtores agrícolas.

A estrutura básica do secador de leito fixo consiste em um compartimento ou câmara onde os grãos são dispostos em camadas em um leito fixo. O ar quente é direcionado para o leito de grãos, passando através dele e removendo a umidade dos grãos. O ar úmido é então retirado do secador, geralmente por meio de um sistema de ventilação ou exaustão.

A simplicidade do secador de leito fixo está relacionada ao seu projeto e operação. Geralmente, é construído com materiais locais, como madeira, metal ou alvenaria, dependendo dos recursos disponíveis na região. A operação envolve a passagem do ar quente através do leito de grãos, que pode ser aquecido por combustíveis como lenha, biomassa, gás natural ou outros meios de aquecimento.

No entanto, é importante observar que a eficiência do secador de leito fixo pode variar dependendo de fatores como a velocidade de ar, a temperatura e umidade relativa do ar, a espessura do leito de grãos, entre outros. Além disso, há limitações em relação à capacidade de secagem e ao controle preciso das condições de secagem.

Em resumo, o secador de leito fixo é uma opção popular em regiões agrícolas devido à sua baixa complexidade construtiva, custo acessível e operação simples. No entanto, é necessário considerar a eficiência e as limitações desse tipo de secador ao projetar e operar um sistema de secagem de grãos (FUGAMALLI, 2007).

Os estudos de secagem em leito fixo e camada fina são fundamentais para compreender e modelar a cinética de secagem de materiais em que há pouca informação disponível. Esses estudos auxiliam no entendimento dos fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem durante o processo de secagem.

De acordo com Prado (2000), a secagem em leito fixo e camada espessa é amplamente utilizada devido à sua simplicidade de construção e operação. Esses sistemas são mais simples em comparação com sistemas mais complexos, o que os torna atrativos em muitas situações.

A modelagem desses sistemas de secagem é imprescindível para projetar e construir secadores de leito fixo eficientes. Através da modelagem, é possível obter dados mais próximos dos processos que ocorrem em grande escala, auxiliando no dimensionamento e otimização dos secadores.

A secagem em secadores de leito fixo é um processo complexo que envolve a transferência de calor e massa entre o ar e o produto a ser seco. Compreender esse processo é fundamental para prever as distribuições de umidade e temperatura no leito de grãos ou material a ser seco. Isso é crucial para otimizar o processo e obter resultados consistentes e de alta qualidade. A análise das propriedades físicas e termodinâmicas dos materiais envolvidos é necessária para ajustar as variáveis do processo e garantir uma secagem eficiente e uniforme.

Através da modelagem desses sistemas, é possível simular as condições de secagem, considerando parâmetros como a velocidade de ar, a temperatura, a umidade relativa, as propriedades físicas do material, entre outros. Esses modelos permitem prever o comportamento do processo de secagem, facilitando a tomada de decisões e o controle das condições de operação em secadores de leito fixo.

Em suma, os estudos e a modelagem da secagem em leito fixo e camada fina e espessa são essenciais para compreender os processos de transferência de calor e massa envolvidos, bem como para projetar e construir secadores eficientes (RUIZ-LÓPEZ et al., 2008)

### *2.3.1.1 Secagem com camada fina*

Nos experimentos de secagem em camada fina, o ar é direcionado de forma constante em termos de umidade, temperatura e fluxo de ar, atravessando uma camada fina de material úmido. Esses experimentos são realizados para compreender os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem durante o processo de secagem de produtos agrícolas.

Através desses experimentos, é possível obter dados sobre a taxa de secagem, o tempo de secagem e outras variáveis relevantes para o processo. Essas informações são utilizadas para desenvolver equações que descrevem o comportamento da secagem.

As equações para camada fina são importantes porque fornecem uma base matemática para entender e modelar o processo de secagem. Elas permitem prever a taxa de secagem em diferentes condições de operação, considerando fatores como a umidade relativa do ar, a temperatura, o fluxo de ar e as propriedades físicas do material.

Além disso, a modelagem matemática usando equações de camada fina permite simular o comportamento do processo de secagem em diferentes cenários, o que é útil para prever o desempenho de secadores em escala industrial e facilitar a tomada de decisões durante o projeto e operação de sistemas de secagem (JAYAS et al., 1991).

O modelo de cinética de secagem em camada fina, conforme descrito por (JAYAS et al., 1991), tem sido aplicado em duas situações principais. A primeira é quando se considera um único grão livre no ar de secagem, ou seja, um grão isolado em contato direto com o ar. A segunda é quando se considera uma monocamada de grãos, onde vários grãos estão dispostos em uma camada fina.

No caso da monocamada de grãos, o modelo é aplicável se as condições de temperatura e umidade relativa do ar de secagem forem consideradas constantes e no mesmo estado termodinâmico em todos os tempos de secagem. Essa suposição permite que o processo de secagem seja calculado de forma simplificada,

considerando que a camada fina de grãos se comporta de maneira similar a um único grão.

É importante ressaltar que a espessura da camada fina pode variar conforme a velocidade, temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Isso significa que a espessura da camada pode mudar durante o processo de secagem, conforme as condições de secagem se modificam.

Quando uma camada de material a ser seco em um leito fixo apresenta gradientes insignificantes de umidade e temperatura, pode-se considerar que a secagem ocorreu em camada fina. Nesse caso, o modelo matemático desenvolvido para a secagem de um único grão também pode ser aplicado para descrever a secagem em uma camada delgada, independentemente do método de secagem utilizado. Isso significa que o mesmo modelo pode ser usado para descrever a transferência de calor e massa nessa camada, facilitando a análise e a predição do processo de secagem.

Na cinética de secagem em camada fina, existem diferentes modelos disponíveis, como os difusivos fundamentais, empíricos e semi-empíricos. O objetivo é selecionar o modelo que melhor se ajuste aos dados experimentais e descreva adequadamente a cinética de secagem. Os modelos difusivos fundamentais são mais complexos e consideram propriedades físicas do material, enquanto os modelos empíricos são mais simples e baseados em curvas experimentais. Os modelos semi-empíricos combinam elementos dos dois.

Enquanto os modelos difusivos fundamentais são baseados em equações de transferência de massa e calor, os modelos empíricos e semi-empíricos são mais simplificados. No entanto, os modelos clássicos não consideram completamente os balanços de massa e energia da fase gasosa, sendo necessário considerar esses aspectos em abordagens mais avançadas ou combinadas para uma descrição mais precisa do processo de secagem em camada fina (BARROZO, 1995).

#### *2.3.1.2 Secagem com camada espessa*

Na secagem em camada espessa, é possível modelar o processo como uma composição de camadas delgadas. Uma camada delgada é definida como aquela em que a diferença entre o ar na saída e o ar de entrada não é perceptível. Ao dividir a camada espessa em várias camadas delgadas, é possível analisar separadamente a cinética de secagem em cada uma delas, o que proporciona uma compreensão mais detalhada da transferência de calor e massa dentro do produto (Smith & Hui, 2008).

O processo geralmente passa por uma etapa inicial de pré-secagem, na qual o sistema atinge o regime operacional. Durante essa fase, o produto está a uma temperatura mais baixa do que o ar de secagem, resultando em uma baixa taxa de transferência de massa e uma velocidade de secagem reduzida. À medida que o calor é fornecido pelo ar de secagem, a temperatura do produto aumenta, resultando em um aumento na pressão parcial de vapor d'água e, conseqüentemente, na velocidade de secagem. Esse processo continua até que as transferências de calor e massa atinjam um equilíbrio, no qual as entalpias do ar e do produto na superfície de contato se igualam. É importante notar que essa fase inicial é relativamente curta em comparação com o tempo total de secagem (PARK, 2007).

Conforme mencionado por Lewis & Young (1995) a secagem de grãos pode ser dividida em duas fases principais de transferência de água.

Durante a primeira etapa da secagem dos grãos, a umidade superficial, também chamada de água livre, é removida em uma taxa constante. Isso é realizado por meio do fluxo de ar aquecido que atravessa o leito de grãos. Nessa fase do processo, o fluxo de ar é o fator determinante e o ar saturado de umidade sai da camada de grãos a uma temperatura estável.

Essa etapa é definida pela equação (1),

$$ms = \frac{dM}{dt} = k_y A (H_s - H_a) \quad [1]$$

onde  $t$  é o tempo de secagem,  $M$  é o teor de umidade da amostra (fração em base seca),  $ms$  é a massa de sólido seco da amostra (kg),  $k_y$  é o coeficiente de transferência de massa,  $A$  é a área ( $m^2$ ) para evaporação e  $H_s$  e  $H_a$  são os teores de umidade do ar saturado e no estado de entrada, respectivamente (Smith & Hui, 2008).

Durante esse período, a umidade do produto é elevada, resultando em uma pressão de vapor de água constante em sua superfície, a qual se iguala à pressão de vapor de água pura na temperatura do produto. Além disso, a temperatura do produto se mantém constante e corresponde à temperatura de bulbo úmido (PARK, 2007).

Na primeira etapa, a remoção da umidade ocorre à medida que a água migra do interior para a superfície do produto, o que repõe a perda de água por evaporação na superfície. Esse processo de secagem é acompanhado pela progressão de uma frente de secagem que percorre as camadas de grãos, do fundo até o topo do leito. Quando

a camada superior do leito (limite superior) está completamente seca, o ar que passa pelo leito de grãos deixa de estar saturado. Isso marca o início da segunda etapa de secagem, conhecida como ponto de ruptura (Lewis & Young, 1995).

Durante a segunda etapa, a remoção de calor ocorre de forma mais lenta, resultando em uma taxa de secagem decrescente, à medida que a umidade retida no interior dos grãos é eliminada. Nesse momento, a velocidade de secagem é limitada pela difusão da água através da estrutura dos grãos, e não mais pela transferência de massa na superfície de contato. Isso significa que a capacidade do vapor de água de se mover pelos poros e canais internos dos grãos passa a ser o fator determinante na velocidade de secagem, levando a uma redução gradual no teor de umidade do produto (Lewis & Young, 1995).

Essa etapa é definida pela equação (2):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D(T) \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad [2]$$

A equação mencionada é conhecida como a Lei de Fick, onde M é o teor de umidade sendo uma função que depende da posição e do tempo. Essa equação descreve como o teor de umidade varia no interior do produto, resultando em gradientes de umidade que levam ao movimento da água dentro do sólido (Smith & Hui, 2008).

No segundo período, a vazão de ar deixa de ser um parâmetro crucial para o processo, e a temperatura do ar se torna mais importante. Isso permite a redução da vazão de ar e o aumento da temperatura. Além disso, nessa fase, surge a possibilidade de utilizar a recirculação de ar. Essa etapa é conhecida como o período de cura, onde ocorrem processos de maturação e estabilização do produto. Durante esse período, as condições controladas de temperatura e umidade contribuem para melhorar as características e propriedades finais do produto (Lewis & Young, 1995).

Durante este período, a troca de calor não é mais compensada, o que resulta em um aumento da temperatura do produto. Essa temperatura tende a se aproximar da temperatura do ar, mas não a ultrapassa. À medida que o equilíbrio térmico é alcançado, a velocidade de secagem diminui até se tornar nula. Isso significa que o produto atingiu um estado de equilíbrio com o ar circundante, e não haverá mais perda de umidade do produto.

### **3 Materiais e Métodos (Estudo de Caso)**

Neste capítulo, iremos abordar o estudo das áreas críticas do processo produtivo de malte, com o objetivo de avaliar as oportunidades de aplicação da ferramenta de predição desenvolvida.

#### **3.1 Descrição do processo**

O estudo de caso foi realizado em uma planta de malteação de cevada localizada no estado do Rio Grande do Sul. Nesta planta, o processo de malteio é realizado em bateladas, o que significa que a produção ocorre em lotes separados. O volume total de malte produzido pela planta é de aproximadamente 130.000 toneladas por ano.

Cada batelada de produção consiste na alimentação de 215 toneladas de cevada. Durante o processo de malteação, ocorre uma perda de aproximadamente 15% devido a fatores como evaporação, remoção de impurezas e outros processos relacionados.

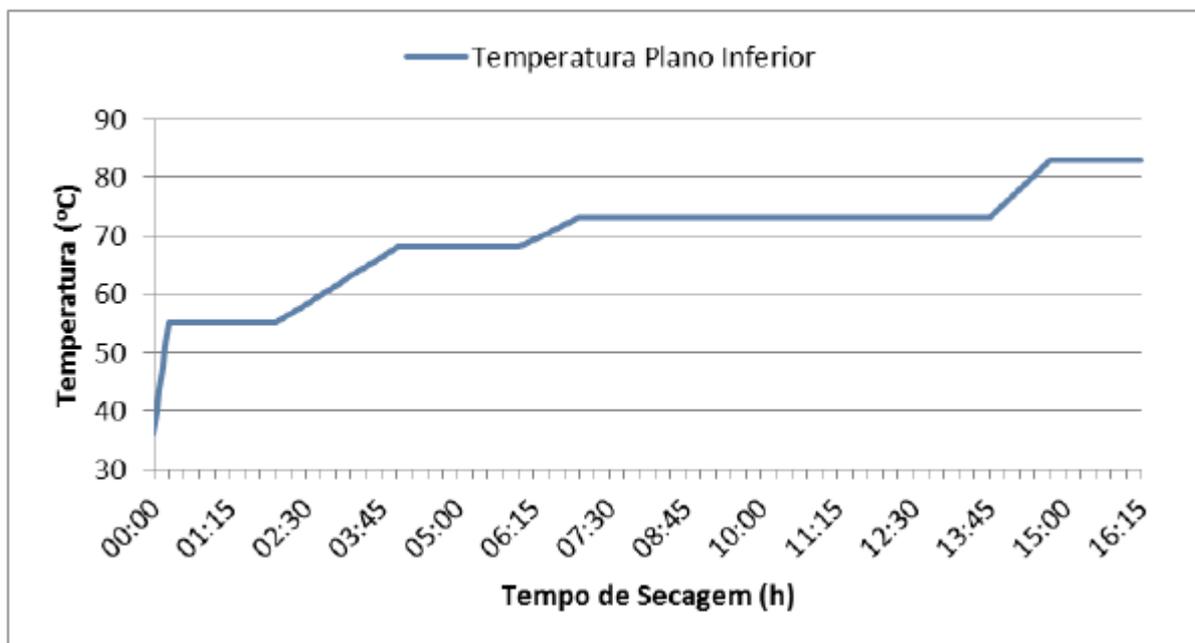
No processo, é notado que a umidade inicial do grão é de 10% ao chegar na unidade de malteação. Durante as etapas iniciais do processo, chamadas de maceração e germinação, a umidade do grão é aumentada. No final do período germinativo, antes do grão entrar na etapa de secagem, a umidade do grão atinge aproximadamente 45%. Essa umidade elevada, presente no grão durante a etapa de germinação, é denominada umidade final de malte verde (UMFV).

Na etapa de secagem, ocorre a remoção de uma grande quantidade de água presente nos grãos de malte, reduzindo o teor de umidade para aproximadamente 5%. Essa remoção de água é realizada em duas estufas retangulares simultaneamente, que possuem dimensões de 15 metros x 15 metros. A carga de malte é carregada nas estufas em camadas com uma altura inicial de cerca de 1,10 metros em cada estufa. A distribuição da carga de malte é feita de maneira uniforme ao longo da área das estufas, garantindo uma secagem homogênea.

Durante o processo de secagem, o calor é aplicado nas estufas para promover a evaporação da água presente no malte. Conforme a água evapora, o teor de umidade do malte diminui gradualmente até atingir o valor desejado de 5%. Esse processo é essencial para preservar a qualidade do malte e garantir sua estabilidade e armazenamento adequados.

No interior das estufas, o ar quente é impulsionado através do leito de grãos a uma vazão de aproximadamente 100 m<sup>3</sup>/s. Para essa finalidade, são utilizados dois ventiladores axiais em cada estufa, operando a uma velocidade de 705 rotações por minuto (rpm).

O ar utilizado no processo de secagem é captado do ambiente externo e passa por um conjunto de radiadores, onde sua temperatura é aumentada. A temperatura do ar de secagem é definida por uma curva que é alimentada no sistema de controle do processo, sendo determinada pelo malteador. Inicialmente, essa curva segue um modelo semelhante ao apresentado na Figura 6 do estudo, com pequenas variações entre os diferentes lotes.



**Figura 6** – Curva de secagem padrão (AMBEV).

No sistema de troca de calor, o fluido quente utilizado para aquecer o ar de secagem nos radiadores é água. Essa água é fornecida por uma caldeira do tipo fogo tubular, operando a uma pressão de 4,5 kgf/cm<sup>2</sup>. A caldeira é alimentada por meio da queima de gás natural, gerando o calor necessário para aquecer a água.

O controle da temperatura do ar de secagem é realizado por meio de uma válvula três vias. Essa válvula determina a fração da vazão de água proveniente da caldeira que é direcionada para o processo de secagem. Através do controle da abertura da válvula, é possível ajustar a quantidade de água quente que entra em contato com o ar, regulando assim a temperatura do ar de secagem.

Assim, o consumo de energia calorífica é determinado pela quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do ar ambiente até a temperatura exigida pela curva de secagem. Essa energia é obtida através da troca de calor entre a água quente proveniente da caldeira e o ar ambiente ao longo de todo o período de secagem.

O volume de gás natural consumido pela caldeira está diretamente relacionado a esse consumo de energia calorífica. O gás natural é utilizado como combustível na caldeira para gerar o calor necessário para aquecer a água e, conseqüentemente, o ar de secagem. O consumo de gás natural é um indicador importante que a unidade acompanha diariamente para monitorar o desempenho e a eficiência do processo de secagem.

Após a secagem do malte, amostras são enviadas ao laboratório para análise de qualidade. Os parâmetros analisados incluem extrato, diferença de extrato, cor de cocção, FAN, beta-glucanos, poder diastásico e outros. Para o estudo em questão, FAN, beta-glucanos, poder diastásico e cor de cocção foram os parâmetros considerados, pois são os mais influenciados pela etapa de secagem. Essas análises garantem que o malte atenda aos padrões de qualidade estabelecidos para a produção de cerveja.

## **3.2 Metodologia Aplicada**

### *3.2.1 Inteligência Artificial*

A inteligência artificial, também conhecida como IA, é uma ciência inovadora e relativamente recente que se destaca por sua capacidade de representar o funcionamento cerebral humano e seu método de cálculo diferenciado da computação digital convencional (HAYKIN, 2007). Inicialmente desenvolvida no contexto militar para decodificação de mensagens, a IA trouxe avanços significativos na metodologia algébrica e análise de textos em diferentes idiomas (CAPUANO et. al., 2009).

A inteligência artificial é baseada em sua capacidade de armazenar conhecimento, utilizando essa memória para resolver problemas e adquirir conhecimento por meio da experiência. Os elementos fundamentais da inteligência artificial são a representação, o raciocínio e a aprendizagem.

A representação envolve a utilização de uma linguagem estrutural simbólica para representar conhecimentos genéricos e específicos, a fim de resolver problemas. O conhecimento pode ser classificado como declarativo, que consiste em procedimentos gerais para manipular fatos, e procedimental, que é baseado em um código executável que representa o significado do conhecimento (Haykin, 2007).

O raciocínio é a habilidade de resolver problemas e utiliza técnicas de regras, dados e controle. As regras operam sobre os dados e o controle sobre as regras. Além disso, o raciocínio probabilístico também é aplicado, uma vez que em muitas situações o conhecimento disponível é incompleto ou impreciso.

A aprendizagem é um modelo de retenção de conhecimento, onde a máquina melhora suas habilidades por meio da alimentação de bases de conhecimento e da revisão de hipóteses levantadas. Ao receber informações imperfeitas do ambiente, a metodologia de aprendizagem é capaz de discernir detalhes que não têm impacto ou de preencher detalhes ausentes (KOVÁCS, 2006).

### 3.2.2 Método de Regressão Linear

O método de regressão linear é uma técnica amplamente utilizada no campo de *Machine Learning* para prever valores contínuos com base em um conjunto de *features* (ou variáveis independentes). Ele assume uma relação linear entre as *features* e a variável alvo.

A regressão linear busca ajustar uma linha reta aos dados de treinamento, de modo que minimize a diferença entre os valores preditos pela linha e os valores reais da variável alvo. Essa linha é representada pela equação da regressão linear, que tem a seguinte forma geral:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad [3]$$

- $y$  é a variável alvo que desejamos prever.
- $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  são os coeficientes (ou pesos) que multiplicam as *features*  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , respectivamente.
- $x_1, x_2, \dots, x_n$  são as variáveis independentes que são usadas para prever  $y$ .

Durante o treinamento do modelo de regressão linear, o objetivo é encontrar os melhores valores para os coeficientes  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , ...,  $b_n$  que minimizem o erro entre os valores preditos e os valores reais da variável alvo.

Isso é geralmente feito usando uma técnica chamada "mínimos quadrados ordinários" (OLS), que calcula os coeficientes de forma a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores preditos e os valores reais.

Uma vez que o modelo é treinado e os coeficientes são estimados, podemos fazer previsões para novos dados, substituindo os valores das *features* na equação da regressão linear. O modelo calculará o valor predito para a variável alvo com base nesses valores.

### 3.2.2.1 Treinamento do Programa

Para desenvolver um sistema de previsão usando regressão linear, é necessário definir as variáveis de entrada considerando as etapas críticas do processo. Isso envolve identificar as etapas mais importantes e as variáveis que influenciam diretamente a previsão. Em seguida, coletam-se dados relevantes, realiza-se o pré-processamento e configura-se a estrutura do programa. Após o treinamento e a avaliação do desempenho, ajustes podem ser feitos para melhorar a precisão da modulação.

No processo de coleta de dados para a área de processo de malteação, foi realizado um levantamento das variáveis monitoradas em diferentes etapas do processo. Isso incluiu variáveis relacionadas ao lote de cevada utilizado na fabricação, à etapa de maceração, à etapa de germinação e à área de secagem do malte. Antes da coleta, foi realizada uma triagem prévia, com base no conhecimento do ramo malteiro e com a participação de especialistas malteadores e responsáveis pela execução da operação. Essa triagem ajudou a identificar as variáveis mais relevantes e significativas para o processo de malteação.

A ferramenta utilizada para coletar os dados foi um sistema supervisor da unidade, sendo que o armazenamento destes dados foi feito através do programa Microsoft Excel.

De modo que o programa tenha condições de modelar problemas difíceis de especificar, quanto maior a quantidade de informações, isto é, exemplos de

comportamentos, maior será o aprendizado da rede (HAYKIN, 2007). Deste modo, foram 38 categorias de dados coletadas, relativos a 614 fabricações ocorridas entre os meses de janeiro a dezembro do ano de 2023. Na Figura 7 está representada a planilha de dados obtidos e a respectiva classificação quanto à área de monitoramento.

secagem																
LOTE	Temp. Cura	DELTA REVERSÃO (°C)	DELTA DB (°C)	DELTA REDUÇÃO (°C)	Temper DB média (°C)	Temper máx final sec média (°C)	T inicial secagem (°C)	T secagem até DB (°C)	Tempo final E03 M2 (h)	Tempo final E04 M2 (h)	Altura E03 M2 (cm)	Altura E04 M2 (cm)	Tempo secagem E3	Tempo secagem E4		
1	81	4	4	5	37,2	67,1	55	73	173	75	80	130	31/12/2022 19:40	01/01/2023 07:20	31/12/2022 19:40	01/01/2023 07:20
2	81	4	4	5	37,75	67,85	55	73	35	35	80	130	01/01/2023 07:20	01/01/2023 23:45	01/01/2023 07:40	02/01/2023 03:40
3	81	4	4	5	39,2	68,3	55	73	125	100	90	120	01/01/2023 23:45	02/01/2023 19:40	02/01/2023 03:40	02/01/2023 21:40
4	80	7	7	5	20,5	71,9	60	73	112	85	112	103	02/01/2023 19:40	03/01/2023 10:55	02/01/2023 21:00	03/01/2023 11:45
5	80	7	7	5	40,3	70,75	60	73	135	118	110	103	03/01/2023 10:55	04/01/2023 01:20	03/01/2023 11:45	04/01/2023 02:20
6	80	7	7	5	40,15	69,34	60	73	90	125	110	103	04/01/2023 01:20	04/01/2023 15:47	04/01/2023 02:20	04/01/2023 16:20
7	81	4	4	5	37,4	65,965	50	73	140	35	108	106	04/01/2023 15:47	05/01/2023 07:08	04/01/2023 16:25	05/01/2023 07:40
8	81	4	4	5	36	60,75	55	73	85	95	105	104	05/01/2023 07:08	05/01/2023 21:28	05/01/2023 07:00	05/01/2023 20:40
9	81	4	4	5	37,1	29,15	55	73	81	65	110	100	05/01/2023 21:28	06/01/2023 11:45	05/01/2023 20:40	06/01/2023 10:40
10	81	4	4	5	36,4	63,15	55	73	35	35	110	103	06/01/2023 11:45	07/01/2023 01:50	06/01/2023 10:15	07/01/2023 00:20
11	81	4	4	5	36,8	66,8	55	73	83	60	108	105	07/01/2023 01:50	07/01/2023 15:50	07/01/2023 00:20	07/01/2023 14:40
12	80	5	4	5	36,95	69,05	55	73	151	169	108	105	07/01/2023 15:50	08/01/2023 07:00	07/01/2023 14:45	08/01/2023 06:30
13	80	4	4	5	36,65	64,6	55	73	108	35	114	103	08/01/2023 07:00	08/01/2023 22:55	08/01/2023 06:30	08/01/2023 20:30
14	81	7	4	5	37,75	65,765	55	73	100	83	113	107	08/01/2023 22:55	09/01/2023 14:15	08/01/2023 20:35	09/01/2023 11:40
15	81	4	4	5	37,8	67,8	55	73	60	55	108	113	09/01/2023 14:15	10/01/2023 03:45	09/01/2023 14:20	10/01/2023 03:40

Figura 7 – Planilha de dados de processo (Elaborada pelo autor).

Utilizou-se a metodologia de correlação para analisar o grau de relação entre as diversas categorias de dados coletados, a fim de selecionar as variáveis de entrada relevantes. O principal objetivo dessa seleção foi determinar o impacto de cada valor de entrada, descartando aquelas com pouca influência no resultado final desejado. Dessa forma, foi possível identificar um conjunto de variáveis independentes que melhor representassem a correlação com as variáveis de resposta. Esse processo também contribuiu para o entendimento dos dados envolvidos e das relações de causa e efeito, facilitando a compreensão do problema em questão.

Para reduzir a redundância dos valores na base de dados, foi aplicada a técnica de normalização. Essa técnica estatística visa minimizar os problemas decorrentes de dispersões diversas entre as variáveis. No caso específico, utilizou-se a normalização segundo a amplitude, que é adequada para lidar com dispersões heterogêneas. Essa abordagem de normalização, conforme descrita na Equação 4, permite equalizar as escalas das variáveis, tornando-as comparáveis e facilitando sua análise conjunta (Montgomery, 2009).

$$Z = \frac{X - \text{Min}}{\text{Máx} - \text{Min}} \quad [4]$$

Onde:

- $X$ : o valor a ser normalizado;
- $\text{Min}$  : valor mínimo da categoria (base de dados);
- $\text{Máx}$ : valor máximo da categoria (base de dados).

Assim, todas as variáveis de análise são encontradas em uma faixa de 0 a 1, de modo que não haja sobreposição dos indicadores em função de seu valor nominal.

Após a normalização, as variáveis foram utilizadas para construir uma matriz, na qual foi aplicada a correlação de Pearson. Essa metodologia estatística é usada para quantificar a força da associação linear entre duas variáveis. A fórmula da correlação de Pearson, conforme apresentada por Blyth (1994), é empregada para calcular o coeficiente de correlação, que varia entre -1 e 1, indicando a direção e a intensidade da relação linear entre as variáveis.

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad [5]$$

Onde:

- $x_i$  : valores de um conjunto de medida;
- $y_i$  : valores de um conjunto secundário de medida;
- $\bar{x}$  : média do conjunto de valores;
- $\bar{y}$  : média do conjunto secundário de valores.

A correlação de Pearson é uma ferramenta estatística de vasta aplicabilidade, que auxiliou na discussão e seleção dos dados.

Uma vez determinadas as variáveis de entrada no programa, o procedimento seguinte caracterizou-se pela etapa de treinamentos, onde padroniza-se os dados de entrada e divide-se os dados em conjuntos de treinamento e teste. Para isso foi utilizado o PyCharm, ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) , projetado especificamente para programação em Python, ele fornece uma ampla gama de

recursos e ferramentas para facilitar o desenvolvimento de aplicativos e projetos em Python. O treinamento do modelo envolve o ajuste dos parâmetros do modelo para encontrar a melhor linha reta que representa a relação entre as variáveis independentes (características) e a variável dependente (alvo).

Inicialmente, os parâmetros do modelo são inicializados e a função de custo é calculada. A função de custo, geralmente o erro quadrático médio (MSE), mede o quão bem o modelo se ajusta aos dados de treinamento. O próximo passo é otimizar os parâmetros do modelo para minimizar a função de custo. Isso é feito utilizando algoritmos de otimização, como o Gradiente Descendente, que ajustam gradualmente os parâmetros em direção à maior descida do gradiente. Esse processo de otimização é repetido até que a convergência seja alcançada ou um critério de parada seja satisfeito.

Após o treinamento, o modelo é avaliado usando o conjunto de teste. Isso envolve a predição dos valores da variável dependente com base nas características do conjunto de teste e a comparação dessas predições com os valores reais. Métricas de avaliação, como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) ou o erro médio absoluto (MAE), são calculadas para medir o desempenho do modelo.

Se o desempenho do modelo não for satisfatório, é possível fazer ajustes adicionais, como a inclusão de novas características ou a modificação de hiperparâmetros. A validação cruzada também pode ser utilizada para avaliar a capacidade de generalização do modelo em diferentes conjuntos de dados. Em resumo, o treinamento de um modelo de regressão linear envolve a preparação dos dados, otimização dos parâmetros, avaliação do desempenho e ajustes necessários para melhorar a precisão do modelo.

A visualização dos resultados é uma etapa importante no processo de regressão linear. Ela envolve a criação de gráficos para comparar as predições do modelo com os valores reais. Esses gráficos fornecem uma representação visual da precisão do modelo e ajudam a identificar discrepâncias entre as predições e os dados reais.

Além disso, uma matriz de correlação pode ser criada para analisar as relações entre as variáveis do modelo. Essa matriz revela a força e a direção das correlações, permitindo identificar quais variáveis têm maior influência no resultado.

A importância das variáveis pode ser determinada através dos coeficientes do modelo de regressão linear. Esses coeficientes representam o impacto relativo de

cada variável na predição. Um gráfico de barras pode ser usado para exibir a importância relativa das variáveis, facilitando a interpretação dos resultados.

Quando o modelo é aplicado a novos dados, é necessário carregar e pré-processar esses dados da mesma maneira que foi feito com os dados de treinamento. Em seguida, o modelo treinado é utilizado para realizar predições com base nos novos dados.

## **4 Resultados e Discussões**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela metodologia abordada no estudo. Trata-se do estudo e predição da altura da camada de malte influenciando no processo de secagem. Por fim, examinaram-se os resultados obtidos pela ferramenta e o efeito no processo de malteação.

### **4.1 Avaliação do problema**

Com base na avaliação das áreas do processo de malteação em que ocorreram as maiores interrupções, constatou-se que a área de secagem é a mais afetada por anomalias. Com base nos dados disponíveis de 2023, foram estratificadas as principais causas de falhas nessa área.

Foi constatado que o carregamento desuniforme é a quarta ocorrência mais significativa que impacta a eficiência do processo de secagem. Essa ocorrência está diretamente relacionada à distribuição desigual de malte verde nas duas estufas de secagem do processo produtivo. Isso significa que a forma como o malte verde é distribuído nessas estufas pode levar a diferenças no tempo e na qualidade da secagem, prejudicando a eficiência geral do processo.

Ressaltando, um erro no carregamento de malte verde que pode ocorrer é a distribuição desigual dos dois leitos fixos, resultando em tempos de secagem diferentes. Levando em consideração que a linha de transporte suporta apenas uma estufa por vez. Quando a secagem é concluída em ambos os leitos, ocorre uma perda de produtividade, uma vez que uma estufa fica parada enquanto a estufa subsequente está descarregando o malte seco para o silo de armazenamento. Essa perda de produtividade decorre da falta de sincronização no processo, resultando em tempos ociosos e interrupções desnecessárias.

De acordo com a disponibilidade dos equipamentos, é realizado o carregamento completo do leito de uma estufa, enquanto a estufa secundária finaliza a secagem anterior. Dessa forma, assegura-se que ambos os leitos estejam em funcionamento constante.

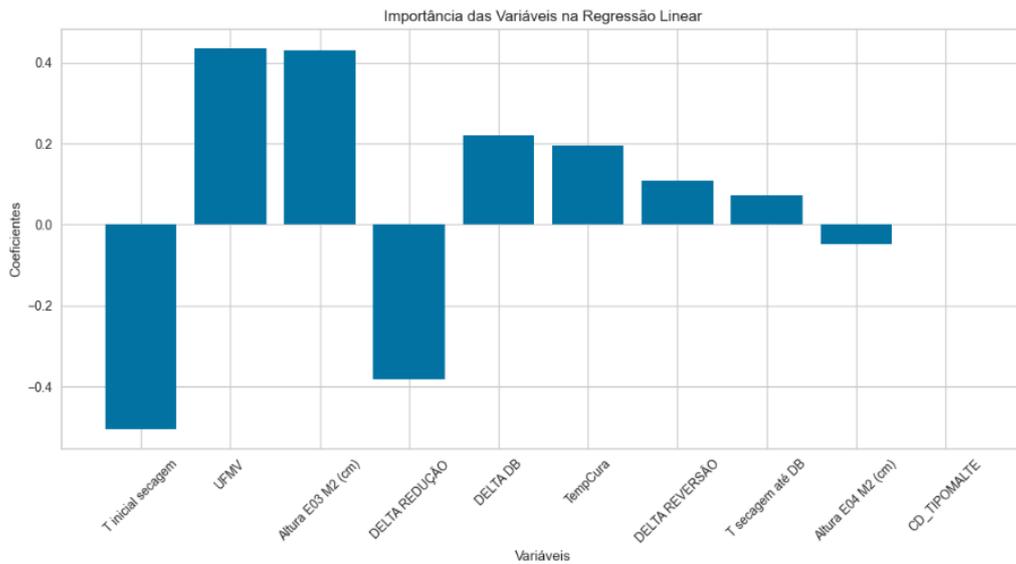
Nesse contexto, o desenvolvimento de um modelo de predição, com informações sobre a altura da camada em cada estufa e o tempo de secagem correspondente, se torna valioso. Isso permite que a operação de malteação module a quantidade de malte em cada leito de secagem com base nas necessidades determinadas. Essa abordagem contribui para otimizar o processo de secagem, melhorando a eficiência e garantindo um uso adequado dos recursos energéticos disponíveis.

#### **4.2 Avaliação das Variáveis**

Ao desenvolver um programa, é essencial definir e identificar as variáveis que serão utilizadas ao longo do código. As variáveis são elementos fundamentais para armazenar e manipular dados durante a execução do programa. Ao definir corretamente as variáveis, é possível organizar e acessar os dados de forma adequada, permitindo que o programa execute as operações desejadas de maneira eficiente e precisa.

Com os valores da importância relativa das variáveis, neste contexto, objetiva-se encontrar os coeficientes que melhor ajustam a relação linear entre as variáveis de entrada (preditoras) e a variável de saída (resposta). Portanto, os coeficientes são uma medida da contribuição relativa de cada variável na predição da variável de resposta.

Ao visualizar a importância relativa das variáveis, é possível identificar quais variáveis têm maior impacto na resposta do modelo. Valores mais altos indicam uma contribuição mais significativa, enquanto valores próximos a zero indicam uma contribuição menor. Na Figura 8 é demonstrado de forma clara através da metodologia desenvolvida quais variáveis possuem maior importância no tempo de secagem de cada secadora.



**Figura 8** – Importância das principais variáveis (Elaborada pelo autor).

Assim, aplicando o método pré-determinado neste estudo, obteve-se resultados essenciais para compreender a influência que a altura da camada de grãos carregados possui. Observa-se a altura da camada como um dos fatores mais impactantes quando diz respeito ao tempo de secagem. É possível observar seu coeficiente como sendo positivo, ou seja, quanto maior a altura da camada carregada, maior será o tempo de secagem.

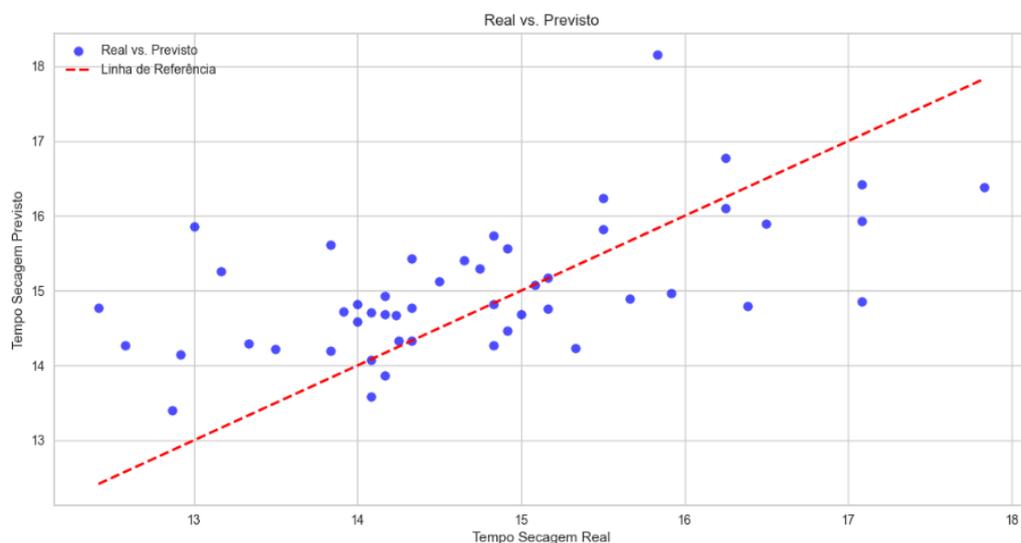
De forma generalizada, se o coeficiente associado a uma variável preditora é positivo ( $b > 0$ ), isso significa que há uma relação positiva entre essa variável e a variável de resposta. Em outras palavras, à medida que o valor da variável preditora aumenta, espera-se que o valor da variável de resposta também aumente. Se o coeficiente é negativo ( $b < 0$ ), indica uma relação negativa entre a variável preditora e a variável de resposta. Isso implica que, à medida que o valor da variável preditora aumenta, espera-se que o valor da variável de resposta diminua.

As variáveis selecionadas como mais influentes dentro da produtividade da secagem foram: temperatura inicial de secagem, UFMV (umidade final de malte verde), Alturas das camadas das estufas, deltas de reversão, DB e redução e temperatura de secagem até o DB. Para esse estudo, foi considerado apenas a variedade de malte Pilsen, visto que é a mais produzida e as secagens possuem padrões diferentes entre diferentes tipos de malte.

Dessa forma, com os resultados apresentados para uma estufa, seria possível concluir que apenas carregar a menor camada possível levaria ao menor tempo de secagem. No entanto, é preciso considerar que, de nada adianta uma das estufas secar em seu tempo mínimo, enquanto a outra demora o dobro de tempo para finalizar, pois isso interrompe o conceito de produtividade de processo, visto que não é possível iniciar o carregamento da próxima fabricação enquanto as duas estufas não estiverem, no mínimo, próximas de finalizar a secagem. Isso justificado por parâmetros de qualidade que impedem que o carregamento da estufa seja paralisado por mais de uma hora sem que seja fornecida ventilação necessária na germinação.

### 4.3 Treinamento do Programa

Após a definição das variáveis de entrada, realizou-se o treinamento do programa para a predição do tempo de secagem baseada nas variáveis definidas. Para isso, o programa foi alimentado com uma planilha com todos os dados de 2023 para entender o padrão e aprender com ele e, em seguida, testado com um valor simbólico de dados para testar sua eficiência. Foi desenvolvido um gráfico de dispersão (Figura 9) visando o melhor entendimento da eficácia do teste realizado.



**Figura 9** – Gráfico de dispersão dos testes (Elaborada pelo autor).

O gráfico de dispersão gerado é uma maneira eficaz de visualizar como as predições do modelo se comparam aos valores reais. Em resumo, pontos próximos à linha diagonal representam predições precisas, pois o valor predito é próximo ao valor

real. Se os pontos estão espalhados ao longo da linha diagonal, isso sugere que o modelo está fazendo previsões razoavelmente boas. Se há uma tendência ou padrão nos pontos, isso pode indicar onde o modelo está acertando ou errando consistentemente.

Baseado nisso, é possível identificar que os valores resultantes do teste de aprendizado são positivos, pois estão espalhados ao longo da linha sem estarem muito distantes da mesma. Obtendo-se assim, um valor médio que possui um percentual de acertos satisfatório em relação aos resultados práticos.

#### 4.4 Resultados de Predição

Através da ferramenta utilizada, após a realização do teste de treinamento garantindo a utilização eficaz do código desenvolvido, apresentado na Figura 10, foi possível criar uma predição para a secagem da fabricação baseado nos dados das variáveis informados previamente.

```
169
170 X_train_scaled = scaler.fit_transform(x_dados_treinamento)
171 X_test_scaled = scaler.transform(x_teste)
172
173 #===== modelo Regressão Linear |
174 model = LinearRegression()
175 model.fit(X_train_scaled, y_dados_treinamento)
176
177 # Previsões
178 y_pred = model.predict(X_test_scaled)
179
180 # Suponha que você já tenha treinado o seu modelo e obtido as previsões para os dados de teste
181 y_p = model.predict(x_teste)
182 y_true = y_teste
183
184 # Avaliar o desempenho do modelo
185 mse = mean_squared_error(y_teste, y_pred)
```

**Figura 10** – Parte exemplo do programa realizado em PyCharm para a realização da predição (Elaborada pelo autor).

Dessa forma, o programa foi alimentado com uma sequência de dados para prever qual o tempo de secagem resultante dessa combinação de dados, sendo possível determinar a altura da camada de malte em cada uma das estufas para que a secagem seja a mais otimizada possível, baseando-se nos demais fatores. Na Figura 11, podemos ver um exemplo de uma planilha alimentada com nove dados de fabricações e a predição do tempo de secagem de cada uma delas, tornando possível a tomada de decisão prévia baseada na altura da camada e receita de secagem.

```
[9 rows x 11 columns]
[14.78405868 15.59453452 16.24700977 14.34902547 14.33602323 14.83849792
 13.38568073 15.08646419 14.51614267]

Process finished with exit code 0
```

**Figura 11** – Resultado da predição do tempo de secagem (Elaborada pelo autor).

Com o programa estabelecido, tornou-se possível a modificação de alguns parâmetros para se ajustar ao resultado esperado. Assim, foi desenvolvido um programa paralelo que diz qual a altura da camada ideal para que o tempo de secagem seja o definido pelo operador. Na Figura 12 é demonstrado este código desenvolvido.

```
df = df.loc[df['TIPO DE MALTE'] == 'M. PILSEN']

# converte TIPO de malte para um conjunto numérico
le.fit(df['TIPO DE MALTE'])
df['CD_TIPOMALTE'] = le.transform(df['TIPO DE MALTE'])

# Convertendo a coluna 'hora' para um tipo de dado datetime
df['E3'] = pd.to_datetime(df['E3'])
# Extraindo a hora e o minuto para novas colunas
df['ME3'] = df['E3'].dt.hour + df['E3'].dt.minute / 60.0
# Convertendo a coluna 'hora' para um tipo de dado datetime
df['E4'] = pd.to_datetime(df['E4'])
# Extraindo a hora e o minuto para novas colunas
df['ME4'] = df['E4'].dt.hour + df['E4'].dt.minute / 60.0

df.loc[df['ME3'] > 15, 'ME3'] = 15
```

**Figura 12** – Código de predição da altura de camada ideal (Elaborada pelo autor).

Neste caso, foi realizado o teste solicitando que o tempo de secagem fosse menor que 15h, visto que essa é a média de tempo de secagem das fabricações do ano de 2023. No entanto, é possível utilizar qualquer que seja o valor necessário, contanto que respeite os parâmetros de qualidade, visto que o olhar para produtividade é essencial, mas de nada vale se o malte estiver fora dos padrões de especificação.

Em resumo, tornou-se possível através da utilização da regressão linear fornecer insumos para que o carregamento da camada de malte seja o mais assertivo possível, reconhecendo a importância que a altura do carregamento possui e trabalhando para

que seja possível ajustá-la visando a menor perda de produtividade dentro dos parâmetros utilizados.

## 5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O objetivo principal deste trabalho, que consistia em desenvolver uma metodologia para otimizar o processo de malteação, foi alcançado com sucesso. Por meio da avaliação da eficiência das diferentes áreas do processo produtivo, foi possível identificar a área de secagem como um ponto crítico e de grande influência na produtividade da unidade. Além disso, constatou-se o carregamento de malte úmido nas estufas como uma das ocorrências mais ineficientes na área de secagem, sendo uma atividade operacional carente de procedimentos específicos para sua execução. Essas descobertas destacam a importância de abordar e melhorar o carregamento de malte úmido como uma forma de otimizar o desempenho geral da área de secagem e, conseqüentemente, da malteação como um todo.

Desta maneira, utilizou-se a métrica da inteligência artificial por meio do método de regressão linear para o desenvolvimento de uma ferramenta de predição que promovesse a informação da quantidade a ser adicionada em cada leito de secagem. A regressão linear, apesar de ser um método simples, mostra-se eficaz como um primeiro passo para a padronização e utilização de uma lógica embasada para a determinação do carregamento de malte verde.

Diante da ferramenta, foi realizado um código que prediz qual será o tempo de secagem baseado na alimentação dos dados anteriores do processo e, paralelamente, um código que determina qual a altura de camada ideal para alcançar um tempo de secagem pré-determinado.

De maneira a complementar o sistema de predição, após a introdução do padrão na rotina, devem ser introduzidas novas variáveis relacionadas ao processo de fornecimento de calor dos ventiladores eficiência da pressão determinada no plano inferior das secadoras. Assim, é possível tornar o programa cada vez mais eficiente e complexo dentro das possibilidades. A utilização de modelos mais complexos e desenvolvidos dentro da inteligência artificial também deve ser considerada para

melhorias futuras. Por fim, após a introdução da predição da forma mais eficaz possível, a replicação para outras áreas do processo também será estudada.

Diante disso, constata-se que a utilização da inteligência artificial, mesmo nos seus modelos mais simples, como a regressão linear, apresenta-se como uma alternativa satisfatória no desenvolvimento de um sistema de modulação para a distribuição de malte úmido nos dois leitos de secagem da maltaria em análise. O sistema inteligente desenvolvido demonstrou eficácia na otimização do processo produtivo de malteação, proporcionando possibilidades de melhor controle e eficiência na distribuição dos grãos nas estufas. Além disso, este trabalho apresenta oportunidades significativas para aprimoramentos futuros e uma maior contribuição para o setor de engenharia, permitindo a implementação de soluções cada vez mais avançadas e sofisticadas na área de malteação. Ao explorar o potencial dos modelos, abre-se um caminho promissor para otimizar ainda mais os processos de produção de malte, impulsionando a indústria a alcançar melhores resultados e eficiência em suas operações.

## REFERÊNCIAS

1. AQUARONE, E.; LIMA, U. A; BORZANI, W. - Biotecnologia industrial. Alimentos e bebidas produzidos por fermentação Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo, Vol. 4, 1983.
2. AQUARONE, E.; LIMA, U. A; BORZANI, W. – Biotecnologia industrial. Biotecnologia na produção de alimentos. Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo, Vol. 5, 2001.
3. BARROZO, M. A. S. Transferência de calor e massa entre ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados. 1995. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1995
4. BLYTH, Stephen. **Karl Pearson and the Correlation Curve**. International Statistical Review, 1994, 3: 393-403.
5. BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R. Brewing science and practice. New York. Woodhead Publishing Limited, 2004
6. BRIGGS, D. E. (2012). Malting and Brewing Science. London: Springer.
7. CABRAL, T., & CORDEIRO, J. (2004). Da cevada ao malte. Acesso em Janeiro de 2024, disponível em Associação Portuguesa dos Técnicos de Cerveja e Malte
8. CAPUANO, Ethel Airton; CASAES, Julio; DA COSTA, Julio; DE JESUS, Magda; MACHADO, Marco Antonio. **Inteligência competitiva e suas conexões epistemológicas com gestão da informação e do conhecimento**. Ciência da Informação, 2009, vol. 38, n. 2, pp. 19-34.
9. CARVALHO, N. M.. **A secagem de sementes**. Jabotical: FUNEP, 1994. 165p.
10. CERVBRASIL. Anuário 2016. Disponível em: <[http://www.cervbrasil.org.br/arquivos/anuario2016/161130\\_CervBrasil-Anuario2016\\_WEB.pdf](http://www.cervbrasil.org.br/arquivos/anuario2016/161130_CervBrasil-Anuario2016_WEB.pdf)>. Acesso em: 08 jan. de 2024.
11. CHEN, X. D., & MUJUMDAR, A. S. (2008). Drying Technologies in Food Processing. John Wiley & Sons.

12. EBC, European Brewery Convention. (2000). *Malting Technology, Manual of Good Practice*. Nürnberg: Fachverlag Hans Carl.
13. FUMAGALLI, F. Estudo da secagem das sementes de *Brachiaria brizantha*. 2007. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2007.
14. HAYKIN, Simon. *Redes neurais: princípios e prática*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
15. Haykin, S. *Neural networks and learning machines*. Prentice Hall, 2007.
16. Hough, J. S. (1982). *Malting and brewing science*. Springer Science & Business Media.
17. JAYAS, D. S., CENKOWSKI, S., PABIS, S., MUIR, W. E. Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Technology*. Vol. 9 (3), 1991. p. 551 – 558
18. JUNIOR, A. A. D.; VIEIRA, A. G.; FERREIRA, T. P. *Resumos Estendidos 2 Processo de Produção de Cerveja*, 2009.
19. Kovács, Z. M. Artificial intelligence methods and tools for systems biology. *Acta Polytechnica Hungarica*, 3(4), 2006.
20. Kunze, W. (2004). *Technology brewing and malting*. VLB Berlin.
21. LEWIS, M. J., & YOUNG, T. W. (1995). *Brewing* (1st ed.). London: Chapman & Hall.
22. MALTEAR – MALTERIA ARGENTINA. **Produção de Malte**. Tres Arroyos. 2009. Disponível em: [http://www.maltear.com/brasil/malte\\_producao.html](http://www.maltear.com/brasil/malte_producao.html)
23. MALTEUROP. Do malte à cerveja. Disponível em: <https://pt.malteurop.com/osnossos-dominios/maltes/do-malte-a-cerveja>
24. MALTEUROP. Maltagem. Disponível em: <https://pt.malteurop.com/osnossosdominios/maltes/maltagem>
25. MONTGOMERY, Douglas. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6 Edição,. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2009.

26. PARK, K. J. (2007). Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem. Campinas: CTEA – UNICAMP
27. Pinheiro, L. C. (2016). Malteação de cevada: fundamentos e tecnologias. Embrapa Trigo.
28. PORTELLA, José A.; EICHELBERGER, Luiz. Secagem de grãos. Brasília: Embrapa, 2001.
29. PRADO, M. M. Secagem de sementes de mamão papaya. 2000. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2000.
30. PRIEST, F. G.; STEWART, G. G. (2006), Handbook of Brewing. Second Edition, Food Science and Technology, Ed. Taylor and Francis Group, LLC, USA, 860p.
31. RUIZ-LÓPEZ, I.I., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C.E., COBOS-VIVALDO, R., HERMAN-LARA, E. Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed beds with airflow reversal. Journal of Food Engineering, 2008, Vol. 89, p. 310-318.
32. SMITH, J. S.; HUI, H. Y.. Food Processing: Principles and Applications. 1. ed. Australia: Blackwell Publishing, 2004.
33. SMITH, J. S., & HUI, Y. H. (2008). Food processing: principles and applications. Ames: Blackwell Publishing.
34. TSCHOPE, E. C.; NOHEL, F. A malteação da cevada. Vassouras: Senai – RJ, 1999. 272p
35. WARPALA, I. W., & PANDIELLA, S. S. (2000). Grist Fractionation and Starch Modification During the Milling of Malt. Food and bioproducts processing, 78, n. 2, pp. 85-89.
36. WEST. Colin J. **The Oxford Companion to Beer definition of Saladin box.** 2020 Disponível em: <https://beerandbrewing.com/dictionary/CrflZwEf1w/>