

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JOSÉ PAULO ALCÂNTARA SOUZA

**MELHORIA DO PROCESSO DE DEGOMAGEM
ENZIMÁTICA EM UMA INDÚSTRIA DE ÓLEO DE SOJA**

Área: Engenharia de Processos

Campo Grande
2024

JOSÉ PAULO ALCÂNTARA SOUZA

**MELHORIA DO PROCESSO DE DEGOMAGEM
ENZIMÁTICA EM UMA INDÚSTRIA DE ÓLEO DE SOJA**

Área: Engenharia de Processos

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Mato Grosso do
Sul.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Lucas de
Oliveira.

Campo Grande
2024

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Paulo José de Souza e Ilda Souza de Alcântara, meu eterno agradecimento pelo amor, apoio incondicional e pela força que me deram em todos os momentos, ensinando-me com seu exemplo o valor da dedicação e da perseverança. Aos amigos e à minha família, que foram um porto seguro e minha inspiração ao longo dessa jornada, meu profundo reconhecimento por cada palavra de encorajamento e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava. Este trabalho é também um reflexo do carinho e suporte de todos vocês.

AGRADECIMENTOS

Ao escrever este espaço, reflito sobre a caminhada até aqui e a importância daqueles que fizeram parte dela. Sou profundamente grato à minha família, especialmente aos meus pais, por acreditarem em mim, me incentivarem a sonhar grande e me apoiarem em cada passo dessa jornada acadêmica. Vocês não apenas me ensinaram a importância do esforço e da determinação, mas também me mostraram, todos os dias, o que é amor incondicional. Cada conselho, cada gesto de apoio e cada palavra de incentivo foram faróis que me guiaram nos momentos mais desafiadores. Este trabalho é tão meu quanto de vocês. Obrigado por serem minha base, minha inspiração e meu maior orgulho.

Neste caminho, fui abençoado com amizades que se tornaram pilares essenciais na minha jornada. Aos meus amigos Murilo Chimiti, Caio Cachoni, Lucca Ueno, Julia Viscardi, Matheus Marinho, Rubia Canelles, Ali Akara e Ary Chagas, minha mais profunda gratidão. Vocês não foram apenas companheiros de estudo, mas verdadeiros irmãos e irmãs que tornaram os momentos desafiadores mais leves e os momentos felizes ainda mais memoráveis. Obrigado por cada risada, cada apoio e cada memória compartilhada, que levarei para sempre em meu coração.

Agradeço ao Prof. Marcos Lucas de Oliveira, cujo apoio e orientação foram fundamentais para a realização deste trabalho. Suas palavras e ensinamentos foram um guia constante.

Por fim, minha gratidão ao Eng. Claudinei Lonardon, que, além de me ajudar a compreender a prática e o mercado de trabalho, compartilhou conhecimento com generosidade, moldando meu olhar para a indústria e a profissão.

A todos vocês, este trabalho também é de vocês. Obrigado por tornarem essa conquista possível.

RESUMO

Este estudo avalia o processo de degomagem enzimática em uma refinaria de óleo de soja com o objetivo de viabilizar uma forma para otimizar o rendimento e a qualidade do produto. Foram analisadas variáveis operacionais e de qualidade como temperaturas do processo, vazão, teor de fósforo e umidade da goma. Os dados foram coletados em tempo real, em pontos críticos da linha de produção, sendo possível, portanto, calcular as perdas teóricas, por umidade e reais, com base no balanço de massa. Para análise utilizou-se dos métodos de estatística descritiva, correlação de Pearson e regressão linear, sendo utilizado o software *Microsoft Excel* e software *Minitab*. Os resultados evidenciaram relações significativas entre variáveis-chave, como qualidade da goma residual, teor de fósforo de entrada, níveis e temperaturas de processo, indicando oportunidades de ajustes operacionais para minimizar perdas. A análise estatística aprofundada forneceu insights valiosos para decisões gerenciais, permitindo a implementação de intervenções específicas que aumentaram a eficiência e a consistência do processo. Conclui-se que a integração de análise gerencial com ferramentas estatísticas é essencial para identificar ineficiências e melhorar o desempenho do processo, garantindo maior competitividade na produção de óleo de soja refinado de alta qualidade.

Palavras-chave: Análise de eficiência operacional; Indústria de óleo de soja; Degomagem enzimática.

ABSTRACT

This study evaluates the enzymatic degumming process in a soybean oil refinery with the aim of optimizing product yield and quality. Operational and quality variables such as process temperatures, flow rate, phosphorus content, and gum moisture were analyzed. Data were collected in real-time at critical points in the production line, enabling the calculation of theoretical, moisture-based, and actual losses based on mass balance. Descriptive statistics, Pearson correlation, and linear regression methods were employed for the analysis using Microsoft Excel and Minitab software. The results highlighted significant relationships between key variables, such as residual gum quality, input phosphorus content, process levels, and temperatures, indicating opportunities for operational adjustments to minimize losses. The in-depth statistical analysis provided valuable insights for managerial decision-making, enabling the implementation of specific interventions that enhanced process efficiency and consistency. It is concluded that integrating managerial analysis with statistical tools is essential for identifying inefficiencies and improving process performance, ensuring greater competitiveness in the production of high-quality refined soybean oil.

Keywords: Operational efficiency analysis; Soybean oil industry; Enzymatic degumming.

SUMÁRIO

1.Introdução.....	8
2.Revisão da Literatura.....	9
2.1. Indústria de óleo de soja.....	9
2.1.1. Refino Químico de Óleo de Soja.....	10
2.2. Degomagem Enzimática com Enzimas PLC.....	11
2.2.1. Análise de Perdas de Processo no Refino de Óleo de Soja.....	12
3. Procedimentos Metodológicos.....	12
3.1. Caracterização da Pesquisa.....	13
3.2. Local de Estudo.....	13
3.3. Técnicas de Pesquisa.....	13
3.3.1. Cálculo de Perdas.....	15
3.4. Estatística aplicada.....	17
3.4.1. Estatística Descritiva.....	17
3.4.2. Estatística Correlacional.....	18
3.4.3. Análise Estatística.....	18
4. Discussão e Análise de Dados.....	20
4.1. Análise Gerencial.....	20
4.2. Análise Estatística.....	25
4.2.1. Estatística Descritiva.....	25
4.2.2. Estatística Correlacional.....	29
4.2.3. Regressão Linear.....	31
4.2.4. Regressão Múltipla.....	35
5. Considerações Finais.....	40
6. Referências.....	42

1 INTRODUÇÃO

A produção de óleo de soja desempenha um papel central na indústria de óleos vegetais, sendo considerada essencial na cadeia alimentícia e para outros setores industriais. Nesse ramo, o Brasil é líder global na produção e exportação de soja destacando-se na exportação de óleo refinado. Esse setor é diversificado e possuem a interferência de empresas internacionais, assim para essas empresas manterem-se competitivas no mercado é necessário, atualmente, investir na otimização dos processos a fim de reduzir seus custos e perdas.

A produção de óleo de soja no Brasil é um pilar fundamental tanto para o mercado interno quanto para o externo. Em 2023, o país exportou aproximadamente 2,33 milhões de toneladas de óleo de soja, gerando uma receita de US\$ 2,5 bilhões (Embrapa). Esses números refletem a robustez do setor e sua importância na balança comercial brasileira. Além disso, o consumo interno de óleo de soja atingiu cerca de 8,68 milhões de toneladas no mesmo período, evidenciando sua relevância na alimentação e em diversas indústrias nacionais (Embrapa). Esses dados destacam a necessidade contínua de otimização dos processos produtivos para manter a competitividade e atender à crescente demanda global.

Para o caso, vem sendo utilizado a análise gerencial e estatística do processo para identificar ineficiências, avaliar a variabilidade operacional e compreender como variáveis de processo afetam os parâmetros de qualidade. Essa abordagem fornece bases sólidas para ações corretivas e preventivas, garantindo maior estabilidade operacional e menor desperdício (Panza et al., 2022).

Diante disso, este estudo explora a análise gerencial e estatística de um processo de degomagem enzimática em uma refinaria de óleo de soja com o objetivo de otimizar o rendimento e a qualidade do produto, nesse contexto foram utilizadas as ferramentas estatísticas para encontrar a relação entre as variáveis e o comportamento das mesmas com outras variáveis independentes. Esse estudo se justifica, porque ao identificar os fatores que podem ser ajustados tem-se uma nova possibilidade de contribuição para a implementação de medidas que poderão reduzir os custos operacionais, e por consequência disso há uma forma de aumentar a sobrevivência da empresa frente a competitividade acirrada do setor produtivo da indústria de óleo de soja.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse tópico serão apresentados de forma breve os conceitos básicos da literatura para melhor compreensão desta pesquisa. Dessa forma, serão abordados os temas: Indústria de Óleo de Soja, destacando sua importância no agronegócio global e no desenvolvimento econômico, com foco na produção, aplicações e impacto ambiental do óleo de soja. Em seguida, será abordado o Refino Químico do Óleo de Soja, detalhando suas etapas e métodos tradicionais e modernos, com ênfase na Degomagem Enzimática com Enzimas PLC, uma inovação sustentável para a remoção de fosfolipídios. Por fim, serão explorados conceitos de Estatística Aplicada, com aplicações específicas em análises descritivas, correlacionais e preditivas no contexto industrial, evidenciando a relevância dessas técnicas para a otimização de processos.

2.1 Indústria de óleo de soja

A indústria de óleo de soja é um dos setores mais relevantes do agronegócio global, impulsionada pela alta demanda por óleos vegetais em diversas aplicações. O óleo de soja é extraído das sementes da planta *Glycine max*, que se destaca como a leguminosa mais cultivada no mundo, com uma produção global de centenas de milhões de toneladas anuais.

Esse óleo é amplamente utilizado na alimentação, representando uma das principais fontes de gorduras na dieta humana, além de ser um componente importante na fabricação de margarinas, maioneses e alimentos industrializados. Paralelamente, o óleo de soja tem papel significativo na indústria química, sendo usado na produção de biodiesel, tintas, lubrificantes e outros produtos industriais (Gunstone, 2011).

A soja, por ser uma cultura de alto rendimento e adaptável, tem papel central em economias agrícolas, especialmente no Brasil, nos Estados Unidos e na Argentina, os três maiores produtores globais. Além disso, a produção de óleo de soja contribui para o desenvolvimento de cadeias produtivas, desde o cultivo e transporte até o processamento e exportação, criando empregos e movimentando economias locais (FAO, 2020).

O crescimento do setor está alinhado com inovações tecnológicas que buscam maior eficiência na produção, redução de impactos ambientais e melhor qualidade do produto. A sustentabilidade tem sido foco da indústria, com práticas voltadas para a redução do consumo de recursos naturais e emissões de gases de efeito estufa, consolidando a soja como uma cultura estratégica no mercado global de óleos vegetais.

2.1.1 Refino Químico de Óleo de Soja

O refino químico tradicional ocorre em várias etapas, incluindo degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização, cada uma desempenhando um papel específico na purificação e melhora da qualidade do óleo final (Erickson, 1995). A degomagem, uma das primeiras etapas, é crucial para remover fosfolipídios que causam turbidez e reduzem a estabilidade do óleo (Shahidi, 2005). O processo de refino do óleo de soja envolve a remoção de impurezas como fosfolipídios, ácidos graxos livres, pigmentos e outras substâncias que podem afetar a qualidade e estabilidade do óleo (Gunstone, 2011).

Na degomagem convencional, métodos como a degomagem aquosa e ácida são amplamente utilizados para precipitar os fosfolipídios. No entanto, esses métodos podem apresentar limitações, especialmente em relação à remoção completa de impurezas fosfatídicas e à estabilidade do óleo final (Moreau, 2005). Recentemente, a introdução de métodos enzimáticos tem ampliado as opções para o tratamento, proporcionando resultados melhores em termos de qualidade e rendimento do óleo (Dijkstra, 2008).

2.2 Degomagem Enzimática com Enzimas PLC

A degomagem, é uma etapa fundamental do refino e visa remover impurezas como fosfolipídios, que afetam a estabilidade e a qualidade do óleo. Recentemente, a introdução da fosfolipase C (PLC) tem promovido avanços significativos nesse processo, permitindo maior eficiência e pureza do produto (Wu et al., 2024).

A aplicação de fosfolipases, como a fosfolipase C (PLC), representa um avanço significativo para a degomagem de óleos vegetais, incluindo o óleo de soja. A PLC hidrolisa fosfolipídios, transformando-os em compostos menos solúveis em óleo e facilitando sua remoção (Dijkstra et al., 2008). Segundo Xu et al. (2011), essa enzima converte os fosfolipídios em diglicerídeos e outras substâncias que são mais facilmente separáveis. Isso permite que a quantidade de fósforo residual no óleo seja reduzida de forma mais eficiente do que em métodos convencionais.

Além de ser eficaz, a degomagem enzimática é uma alternativa mais sustentável, pois reduz o uso de produtos químicos e a necessidade de aquecimento intenso, diminuindo o consumo de energia e os impactos ambientais (De Greyt, 2013). Em um estudo comparativo, Zhang et al. (2018) verificaram que a PLC permite uma maior flexibilidade operacional e a redução de resíduos, elevando a qualidade e estabilidade do óleo refinado.

2.2.1 Análise de Perdas de Processo no Refino de Óleo de Soja

A análise de perdas no processo é uma prática essencial para aumentar a eficiência e reduzir o desperdício em refinarias. As perdas podem ser classificadas como perdas reais, teóricas e por umidade, cada uma com causas e implicações distintas (Nielsen, 2011). A perda real representa o óleo efetivamente perdido no processo; a perda teórica é baseada no fósforo residual ainda presente no óleo após a degomagem; e a perda por umidade está relacionada ao equilíbrio de água nas diferentes etapas do processo, especialmente na centrifugação (Weiss, 2015).

Um estudo de Kirschbaum (2000) identificou que a avaliação e minimização das perdas em cada etapa são fundamentais para melhorar o rendimento do processo. Por meio da análise de variáveis operacionais, como dosagem de enzima, temperatura e vazão, é possível ajustar o processo para minimizar o desperdício e maximizar o rendimento de óleo. Segundo Tyagi e Vasishtha (1996), o monitoramento de variáveis como essas ajuda a otimizar o processo e garantir a qualidade final do óleo.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesse tópico são apresentadas as características desta pesquisa, sua classificação e a abordagem. Por conseguinte, é evidenciado o local de estudo e as técnicas de pesquisa que foram utilizadas para execução deste estudo.

3.1 Caracterização da Pesquisa

Este estudo utiliza uma abordagem quantitativa, fundamentada na coleta e análise de dados numéricos relacionados a variáveis operacionais e de qualidade no processo de degomagem enzimática de óleo de soja. A abordagem quantitativa permite medir e avaliar padrões, associações e impactos das variáveis sobre o rendimento e a qualidade do óleo. Métodos estatísticos descritivos, correlacionais e preditivos são empregados para identificar tendências, entender relações e prever comportamentos no processo industrial. Essa abordagem é adequada para estudos que buscam precisão e objetividade na análise de dados (Creswell e Creswell, 2018). As variáveis utilizadas e suas categorias podem ser visualizadas na no Quadro 1.

Quadro 1 – Variáveis Utilizadas e suas Categorias

(Continua)

Variável	Categoria
Óleo Bruto Entrada (kg)	Independente
Vazão de Óleo Bruto (kg)	Independente
Umidade Óleo Bruto (%)	Independente
Acidez Óleo Bruto (%)	Independente
Fósforo Óleo Bruto (ppm)	Independente
Umidade da Goma (%)	Dependente
Teor de Óleo na Goma (%)	Dependente
Umidade Óleo Degomado (%)	Dependente
Acidez Óleo Degomado (%)	Dependente
Sabões Óleo Degomado (ppm)	Dependente
Fósforo Óleo Degomado (ppm)	Dependente
Nível do Reator (%)	Independente
Temperatura do Reator (°C)	Independente
Temperatura Separação (°C)	Independente
Dosagem de Água (%)	Independente
Dosagem de Enzima (ppm)	Independente
Dosagem de Soda (ppm)	Independente

Quadro 1 – Variáveis Utilizadas e suas Categorias

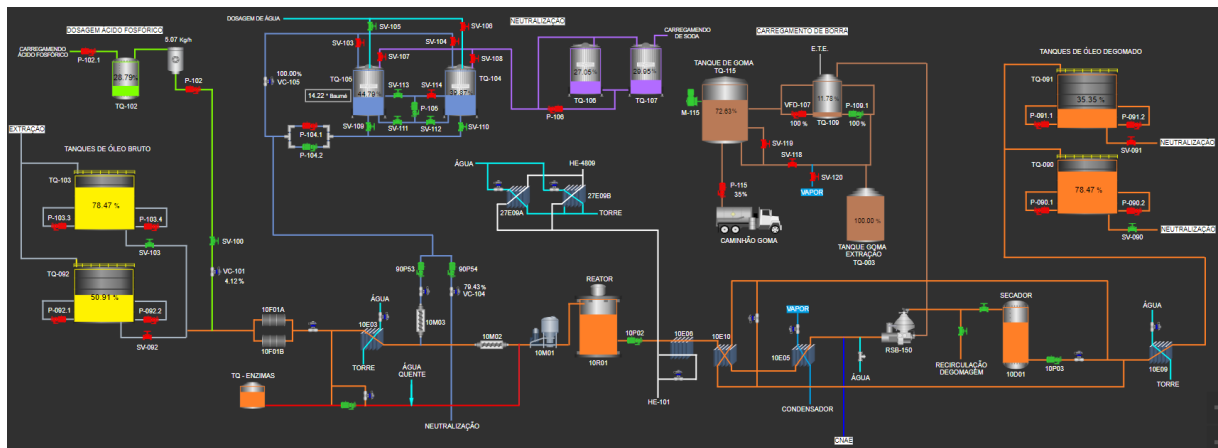
(Conclusão)

Diferença de Fósforo (ppm)	Dependente
Perda Medida (%)	Dependente
Perda por Fósforo (%)	Dependente
Perda por Umidade (%)	Dependente
Contrapressão (bar)	Dependente

Fonte: Autor (2024).

Na figura 1, é possível visualizar o fluxograma do processo desenvolvido na ferramenta *PI Vision*, e também os pontos que foram coletados os dados operacionais, são eles: transmissor de vazão mássica de óleo bruto de entrada, transmissor de vazão mássica de óleo degomado de saída, transmissor de vazão mássica de dosagem de água, transmissor de vazão mássica de dosagem de soda cáustica, transmissor de vazão mássica de dosagem de enzima, transmissor de nível do reator, transmissor de nível do secador, , transmissor de temperatura do reator, , transmissor de temperatura de entrada da centrífuga e transmissor de contrapressão da centrífuga.

Figura 1 – Fluxograma de Processo da Degomagem Enzimática



Fonte: Autor (2024).

O estudo é de natureza exploratória, focando no entendimento das relações entre variáveis-chave e seus impactos no processo de degomagem enzimática. A pesquisa exploratória é ideal para investigar problemas pouco compreendidos ou áreas que exigem maior detalhamento, como a influência de variáveis operacionais (temperatura, dosagens de enzimas, soda cáustica e água) sobre parâmetros de qualidade (fósforo residual, acidez e teor de sabões).

Essa abordagem fornece uma base para gerar hipóteses e orientar futuras intervenções ou estudos no contexto industrial (Gil, 2008). A combinação de uma abordagem quantitativa com uma pesquisa exploratória reforça a capacidade do estudo de identificar padrões e inter-relações nas variáveis analisadas, contribuindo para a otimização de processos industriais e a tomada de decisões mais fundamentadas.

3.2 Local de Estudo

A coleta de dados foi realizada diretamente em uma refinaria de óleo de soja, com foco no processo de degomagem enzimática. Dados operacionais, como temperatura, dosagem de enzimas e teor de fósforo, foram registrados em tempo real a partir de sensores instalados em pontos estratégicos do processo. As medições ocorreram em no período de 8 de novembro de 2023 e 30 de setembro de 2024, seguindo um protocolo padronizado de amostragem para evitar inconsistências. Os dados foram organizados em um sistema centralizado, garantindo sua integridade e facilitando a análise posterior. Procedimentos de verificação e manutenção dos instrumentos foram adotados para minimizar erros de medição e assegurar a confiabilidade das informações coletadas.

A coleta de dados no estudo foi realizada diretamente na refinaria de óleo de soja, com a colaboração em campo entre os pesquisadores e a equipe operacional para registros dos dados. Para os dados de análises laboratoriais, foram coletadas amostras de óleo bruto, óleo degomado e lisogoma, e para os dados operacionais, foi utilizado o histórico dos dados dos equipamentos utilizando a ferramenta *PI Datalink* juntamente ao *Microsoft Excel*.

Para garantir a precisão das medições e a consistência dos resultados, houve um alinhamento constante sobre as variáveis de interesse e ajustes no processo. Foram realizadas reuniões regulares com a equipe de operação, onde discutiram-se as variações nos resultados e possíveis ajustes para minimizar a variabilidade do processo. Além disso, os dados foram registrados em tempo real, com acompanhamento contínuo para garantir que as alterações no processo fossem refletidas nas medições. Esse esforço conjunto permitiu uma análise mais robusta da performance do processo de degomagem enzimática.

3.3 Técnicas de Pesquisa

A análise incluiu o cálculo de perdas utilizando três abordagens: redução teórica de

fósforo, balanço de água e balanço de massa real. Os dados foram coletados de parâmetros operacionais, como vazão de entrada e saída, temperatura de reação e separação, contrapressão da centrífuga, e dosagens de água, soda cáustica e enzimas. Além disso, compuseram a análise os dados de qualidade como fósforo residual, acidez e teor de sabões. Os resultados também servirão para comparação entre diferentes situações incluindo o processo de refino como um todo, como a comparação de perdas entre o processo com e sem degomagem e também a comparação entre as perdas calculadas do processo de degomagem aquosa e degomagem enzimática.

Os dados coletados durante o estudo incluem informações tanto sobre os parâmetros operacionais quanto sobre a qualidade do óleo em diferentes etapas do processo. Os parâmetros operacionais envolvem variáveis como a vazão de entrada e saída, temperaturas de reação e separação, contrapressão da centrífuga e dosagens de soda cáustica, água e enzimas, essenciais para o controle e ajuste do processo. Já os dados de qualidade referem-se a indicadores do óleo bruto e do óleo degomado, incluindo teor de fósforo residual, acidez, níveis de sabões, além de teores de óleo e umidade na goma, que são fundamentais para avaliar a eficácia do processo de degomagem.

Esses dados serviram como base para cálculos de perda, aplicando-se fórmulas para perda teórica (redução de fósforo), perda por balanço de água e perda real (balanço de massa).

3.3.1 Cálculo de Perdas

i. Balanço de Massa:

$$Loss = \frac{[BE] - [RV] - [DV] - [BS]}{[BE]} \quad (1)$$

Elementos:

BE [kg]: Quantidade inicial de óleo bruto no início do processo.

RV [kg]: Variação de nível de óleo registrada no reator.

DV [kg]: Variação de nível de óleo registrada no secador.

BS [kg]: Quantidade final de óleo após o processamento.

Interpretação:

A fórmula mede a diferença entre o óleo bruto recebido, o total de óleo na saída do processo, variação do reator e variação do secador, dividida pela entrada inicial de óleo, expressando a perda relativa em relação ao óleo recebido. Essa métrica é crucial para identificar ineficiências no processo e otimizar rendimentos.

ii. Perda de Fósforo:

$$Loss = \frac{(16,75 \times \frac{[FB] - [FD]}{10000}) + 0,675 + 0,1}{100} \quad (2)$$

Elementos:

FB [ppm]: Concentração inicial de fósforo no óleo bruto.

FD [ppm]: Concentração final de fósforo no óleo degomado.

Constantes (16,75, 0,675, e 0,1): Representam fatores específicos do processo para estimar as perdas de fósforo em diferentes fases.

Interpretação:

A fórmula calcula a perda teórica de óleo devido à remoção de fósforo durante a degomagem, expressa como uma fração do total processado. Este cálculo é crucial para avaliar a eficiência na redução de impurezas e prever possíveis perdas associadas à remoção de fosfolipídios.

iii. Balanço de Água:

$$Loss = \left[\left(\frac{1}{\frac{[GU]}{100}} \right) - 1 \right] \times \left[\frac{[BU]}{100} + [DA] + \frac{0,5 \times [DS]}{10^4 \times 100} + \frac{[DE]}{10^4 \times 100} - \frac{[DU]}{100} \right] \quad (3)$$

Elementos:

GU [%]: Percentual de umidade na goma formada durante o processo de degomagem.

BU [%]: Umidade do óleo bruto antes do processo.

DA [%]: Dosagem de água adicionada no processo.

DS [ppm]: Dosagem de soda cáustica adicionada.

DE [ppm]: Dosagem de enzima adicionada.

DU [%]: Umidade do óleo após a degomagem.

Interpretação:

Esta fórmula avalia o balanço de água no processo, considerando a entrada e saída de umidade e as adições de insumos (água, soda e enzimas). A primeira parte calcula o fator de conversão com base na umidade da goma, enquanto a segunda considera o ganho ou perda de água no sistema. É essencial para identificar discrepâncias no uso de água e avaliar a eficiência do processo.

3.4 Estatística aplicada

A estatística aplicada é uma ciência essencial para a tomada de decisões fundamentadas em diversos setores, especialmente em contextos industriais. Sua relevância se estende desde o controle de qualidade até a modelagem de processos e previsão de resultados, permitindo a análise rigorosa de dados para identificar tendências e variáveis críticas (Montgomery, 2019).

Métodos estatísticos, como regressão linear, correlação de Pearson, assimetria e curtose, foram empregados para identificar padrões e inter-relações entre variáveis. Essa abordagem permitiu compreender a variabilidade dos dados e indicou fatores críticos para a melhoria do processo, reduzindo perdas e aumentando a eficiência (Jung et al., 2023; Zhang et al., 2021).

Ferramentas como a análise de regressão, testes de hipóteses e a modelagem estatística ajudam a compreender relações entre variáveis e otimizam operações complexas (Hair et al., 2010). A aplicação desses métodos tem sido amplamente usada para aumentar eficiência e reduzir custos em processos produtivos.

3.4.1 Estatística Descritiva

A estatística descritiva é uma ferramenta essencial para organizar, resumir e interpretar conjuntos de dados, fornecendo uma visão inicial sobre o comportamento de variáveis relevantes em processos industriais. Técnicas como medidas de centralidade (média, mediana e moda) ajudam a identificar valores típicos dos dados, enquanto medidas de dispersão (desvio-

padrão, variância e amplitude) permitem avaliar a variabilidade e a consistência das variáveis analisadas (Montgomery e Runger, 2010).

Por exemplo, em processos industriais como a degomagem de óleo de soja, a análise da média e do desvio-padrão de variáveis como temperatura e dosagem de enzimas pode indicar padrões operacionais e possíveis desvios que impactam a estabilidade e a qualidade do processo. Essa análise também identifica outliers que podem representar problemas na operação ou oportunidades de melhoria (Weiss, 2015).

3.4.2 Estatística Correlacional

A correlação é uma técnica estatística essencial para identificar e medir o grau de relacionamento entre variáveis. A correlação de Pearson, uma das mais utilizadas, avalia a força e a direção de relações lineares entre variáveis, como a temperatura de um processo e o teor de fósforo residual no óleo refinado (Hair et al., 2009). Essa análise fornece insights sobre como mudanças em uma variável podem influenciar outra, ajudando a entender a dinâmica entre diferentes parâmetros operacionais.

Por outro lado, a regressão linear é uma ferramenta crucial para modelar e prever os efeitos de variáveis independentes sobre uma variável dependente. Essa técnica permite entender como alterações em fatores como dosagem de enzimas ou temperatura impactam diretamente parâmetros de qualidade, como a acidez ou o teor de fósforo do óleo (Montgomery, 2017). A regressão linear oferece uma base quantitativa para otimizar processos, realizando previsões baseadas em dados históricos e auxiliando na tomada de decisões mais assertivas.

As variáveis foram então classificadas conforme a intensidade da correlação: valores entre 0 e 0,2 foram considerados de correlação muito fraca, entre 0,2 e 0,4 de correlação fraca, entre 0,4 e 0,6 de correlação média, entre 0,6 e 0,8 de correlação forte e entre 0,8 e 1 de correlação muito forte (Miot, H. A. (2018).

3.4.3 Análises Estatísticas

Para uma análise aprofundada dos dados foram utilizadas técnicas estatísticas. Essas estão apresentadas no Quadro 2, conjuntamente com suas descrições.

Quadro 2 – Métodos e técnicas estatísticas utilizadas

Método	Descrição
Estatística Descritiva	Cálculo de média, desvio-padrão e variância para avaliar a distribuição dos dados e a variabilidade entre as variáveis.
Assimetria e Curtose	Análise da simetria (assimetria) e concentração nas caudas (curtose) dos dados para identificar desvios em relação à normalidade.
Análise de Correlação	Uso do coeficiente de Pearson para examinar a relação entre variáveis operacionais e dados de qualidade, como fósforo residual e teor de óleo na goma.
Regressão Linear	Exploração das relações entre variáveis independentes (como temperatura e dosagem de enzimas) e dependentes (como teor de fósforo residual), permitindo previsões sobre o comportamento do processo.

Fonte: Autor (2024).

Por conseguinte, para realizar as análises, foram utilizados o *Microsoft Excel* e o software *Minitab*, que são amplamente utilizados na análise de dados devido à sua versatilidade e poder computacional. O *Microsoft Excel* permitiu a manipulação inicial dos dados, como a organização, cálculo de estatísticas descritivas (média, desvio-padrão etc.) e a criação de gráficos para visualização das distribuições dos dados.

Já o *Minitab* foi utilizado para técnicas avançadas, como a análise de correlação, regressão linear e múltipla, facilitando a compreensão das inter-relações entre as variáveis e permitindo ajustes nos modelos de previsão e otimização do processo. O uso combinado dessas ferramentas facilitou a análise dos dados coletados, essencial para uma melhor tomada de decisão e melhoria contínua do processo de degomagem enzimática.

4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Nesse tópico, serão apresentados os principais resultados da análise gerencial e estatística do processo de degomagem enzimática, com foco nas variáveis operacionais e de qualidade do óleo de soja. Além disso, será discutida a aplicação dos métodos estatísticos, como análise de correlação e regressão linear, para otimizar o desempenho do processo e reduzir as perdas, melhorando a eficiência operacional e a qualidade do produto.

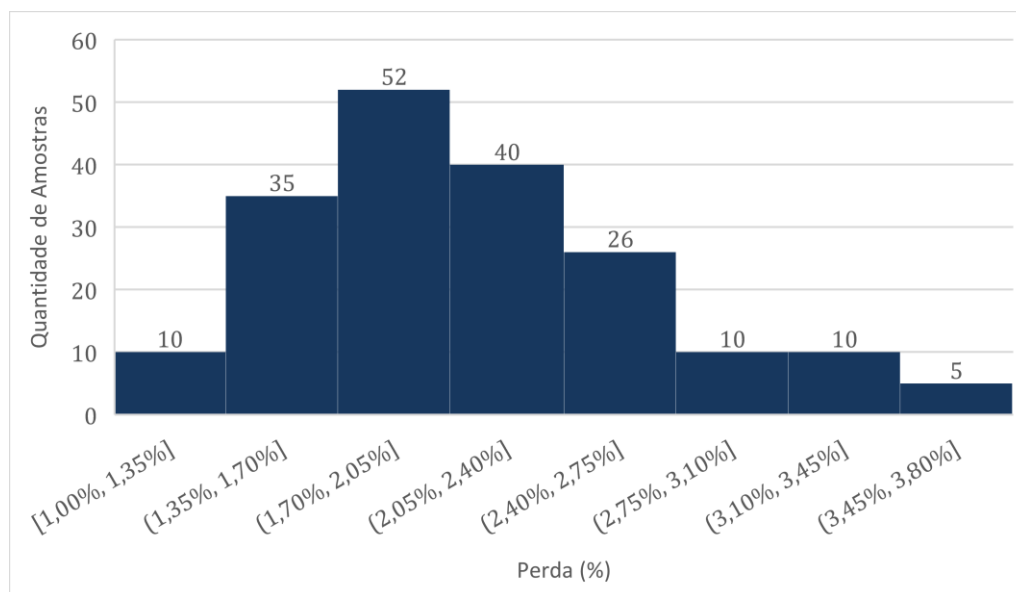
4.1 Análise Gerencial

Para a análise do processo de degomagem enzimática de óleo de soja, foram inicialmente filtrados os dados com base na vazão de entrada, considerando apenas as amostras com uma vazão mássica mínima de 14.000 kg/h, considerando que valores abaixo disso indicariam uma anormalidade no processo do qual pode influenciar nos resultados de perdas.

A filtragem dos dados levou em consideração um total de 327 dias consecutivos de produção de todo o período analisado durante todos os turnos, dos quais 188 dias foram selecionados para análise, resultando em uma amostra representativa de 57,5% dos dias avaliados. A produção total durante esse período foi de 76.795 toneladas.

Isso permitiu que os dados fossem mais representativos e alinhados com o objetivo de avaliar o desempenho do processo em condições ideais, eliminando amostras que não atendiam aos critérios definidos. Os resultados obtidos nos diferentes métodos de análise de degomagem enzimática, apresentados no gráfico a seguir, revelam variações entre os dados observados com o método de "Balanço de Massa" medido apresentando uma perda média de 2,13%. As perdas de perdas da degomagem enzimática podem ser observadas na Figura 2.

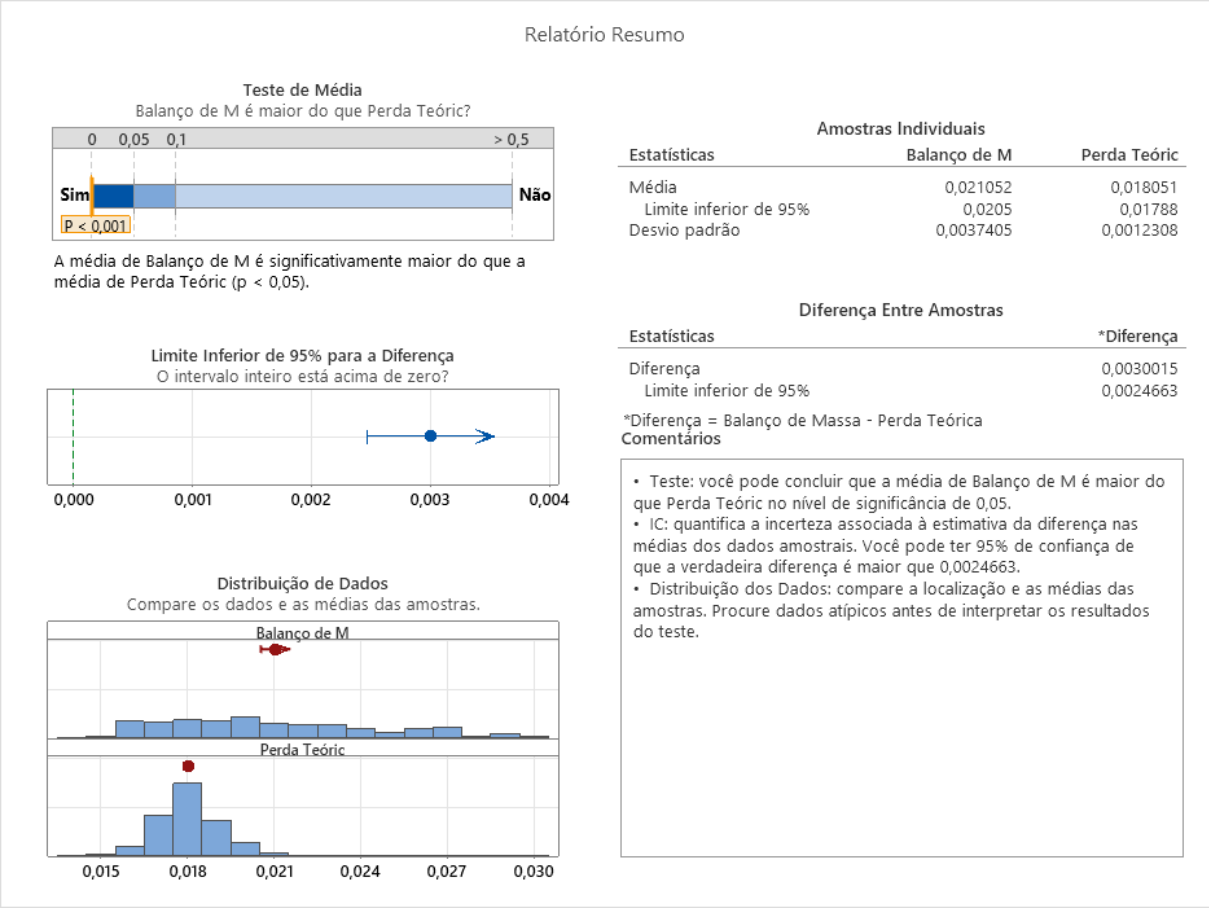
Figura 2 – Histograma de perdas da degomagem enzimática.



Fonte: Autor (2024)

Os métodos teóricos, como o "Teórico Interno" e o "Teórico Fórmula de Venda", apresentaram valores de 1,81%. Essa discrepância sugere que as perdas reais durante o processo podem ser superiores às perdas calculadas por modelos teóricos, indicando a necessidade de ajustes no processo de degomagem para otimização de eficiência e controle da qualidade do óleo. Para comprovação, foi realizado um teste de hipóteses utilizando o Minitab entre as variáveis Balanço de Massa e Perda Teórica, o resultado apresentou uma diferença significativa com um grau de confiança maior que 95%, como pode ser visualizado na figura 3.

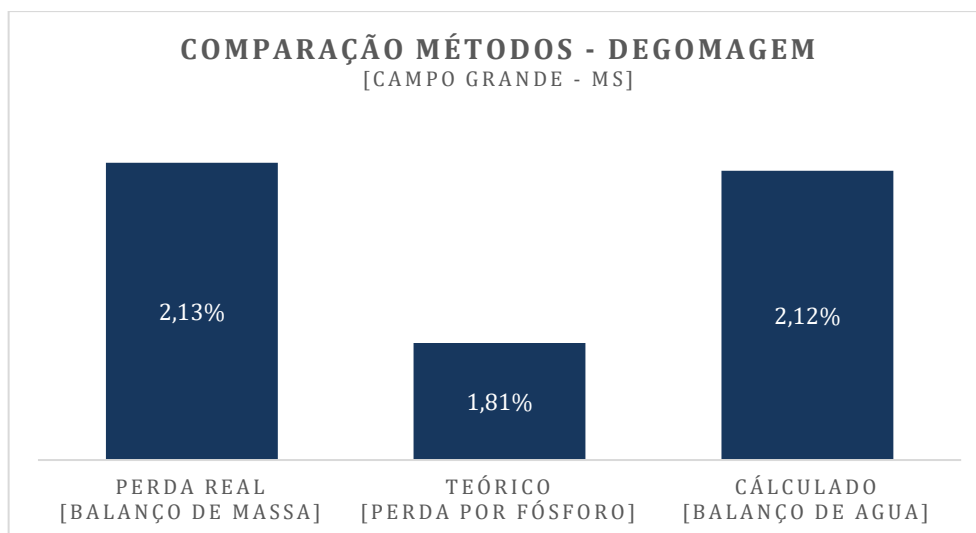
Figura 3 – Teste de Hipóteses: Balanço de Massa e Perda Teórica.



Fonte: Autor (2024)

A análise do "Balanço de Água", que resultou em uma perda de 2,12%, também reflete essa tendência, reforçando a relevância de uma abordagem integrada que considere as variáveis operacionais em tempo real para um controle mais preciso do processo como pode ser observado na Figura 4.

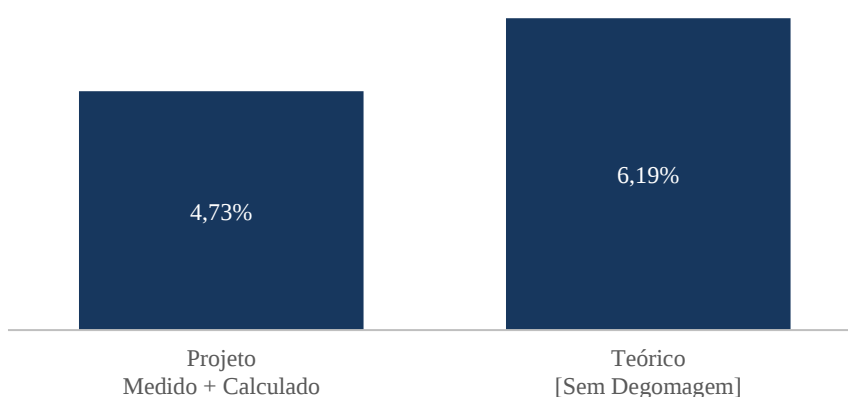
Figura 4 – Comparação de métodos de degomagem.



Fonte: Autor (2024)

Na Figura 5 são apresentadas a comparação entre os processos de degomagem enzimática e sem degomagem, sendo este último apenas com a neutralização, mostra uma diferença nas perdas totais. Com a neutralização, as perdas totais foram de 6,19%, enquanto no processo com degomagem, as perdas caíram para 4,73%. Esses resultados indicam que a degomagem, além de neutralizar, contribui para a redução das perdas, melhorando a eficiência do processo de produção do óleo, em comparação com a neutralização simples.

Figura 5 – Comparação de perda do processo de degomagem enzimática.

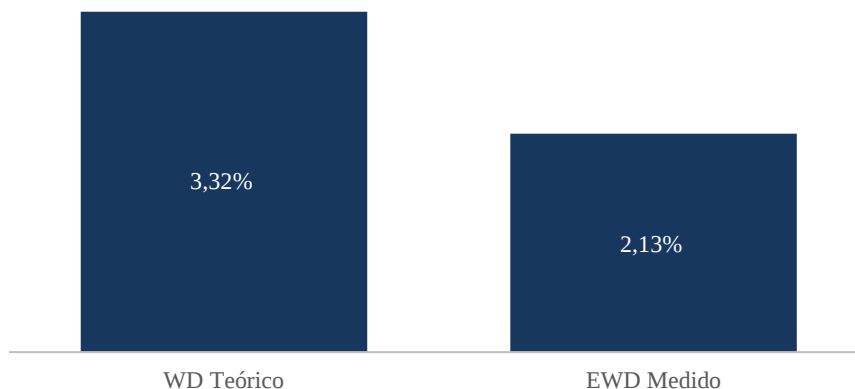


Fonte: Autor (2024)

Na Figura 6, são comparadas as perdas entre dois tipos de degomagem: a aquosa (WD Teórico) e a enzimática (EWD Medido). No processo de degomagem aquosa, o valor teórico das perdas é de 3,32% considerando um cálculo com médias de períodos anteriores a

degomagem enzimática, enquanto no processo de degomagem enzimática, utilizando a enzima fosfolipase C (PLC), as perdas observadas são de 2,13%. Isso indica que a degomagem enzimática apresentou uma redução significativa nas perdas quando comparada à degomagem aquosa. Esse dado pode sugerir uma maior eficiência do processo enzimático, possivelmente devido à sua capacidade de remover componentes indesejados de forma mais seletiva e controlada.

Figura 6 – Comparação da perda com degomagem aquosa e enzimática.



Fonte: Autor (2024)

4.2 Análise Estatística

4.2.1 Estatística Descritiva

Para a análise estatística, foi utilizado o mesmo tratamento de dados durante o período selecionado de 188 dias. O processo inicial incluiu o cálculo de medidas de tendência central e dispersão, como a média e o desvio-padrão, bem como a variância e a amplitude. Além disso, foram realizadas verificações da distribuição dos dados, analisando a assimetria e a curtose, com o objetivo de avaliar a simetria da distribuição dos dados e a presença de valores extremos. Esses cálculos forneceram uma visão sobre a variabilidade e a distribuição dos parâmetros dos processos analisados.

A partir dos resultados obtidos nos cálculos estatístico, foi possível observar que a maioria das variáveis, como " Óleo Bruto Entrada", " Vazão de Óleo Bruto" e "Dosagem de Enzima", apresentaram médias e medianas próximas, sugerindo dados razoavelmente simétricos. No entanto, a variável "Perda por Umidade" apresentou uma discrepância significativa entre média (2,59%) e mediana (2,40%), indicando assimetria na distribuição, confirmada pela alta assimetria de 10,048. Os dados de base da análise podem ser observados no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados Primeira Filtragem

Medidas	Média	Mediana	Desvio-padrão	Amplitude	Assimetria	Curtose
Óleo Bruto Entrada (kg)	407823,79	405617,61	30444,35	136908,66	-0,05	-0,47
Vazão de Óleo Bruto (kg)	16992,66	16900,73	1268,51	5704,53	-0,05	-0,47
Umidade Óleo Bruto (%)	0,18	0,18	0,04	0,48	6,17	64,58
Acidez Óleo Bruto (%)	1,14	1,17	0,19	0,92	-1,04	0,86
Fósforo Óleo Bruto (ppm)	787,63	751,14	107,49	650,02	1,28	1,64
Umidade da Goma (%)	56,90	58,02	4,73	29,78	-1,26	2,44
Teor de Óleo na Goma (%)	30,13	29,03	6,37	43,66	1,28	2,80
Umidade Óleo Degomado (%)	0,11	0,10	0,04	0,21	0,87	0,29
Acidez Óleo Degomado (%)	0,95	0,99	0,22	1,38	-1,27	2,66
Sabões Óleo Degomado (ppm)	166,36	162,81	52,16	232,57	0,29	-0,57
Fósforo Óleo Degomado (ppm)	167,83	161,40	54,10	334,25	0,93	1,58
Nível do Reator (%)	70,94	72,12	9,55	50,56	-0,94	1,18
Temperatura do Reator (°C)	56,45	56,01	3,56	16,72	0,36	-0,60
Temperatura Separação (°C)	84,81	84,89	6,89	42,65	0,57	1,42
Dosagem de Água (%)	0,03	0,03	0,00	0,01	-0,47	-0,06
Dosagem de Enzima (ppm)	194,80	200,00	13,77	70,00	0,47	0,35
Dosagem de Soda (ppm)	172,60	180,00	35,66	190,00	-1,26	2,15
Diferença de Fósforo (ppm)	619,80	599,02	88,10	626,78	1,30	3,28
Perda Medida (%)	0,02	0,02	0,01	0,07	2,11	10,13
Perda por Fósforo (%)	0,02	0,02	0,00	0,01	1,30	3,28
Perda por Umidade (%)	0,03	0,02	0,01	0,16	10,05	123,43
Contrapressão (bar)	2,51	2,50	0,36	3,29	1,70	8,72

Fonte: Autor (2024)

O desvio-padrão elevado em variáveis como "Perda por Umidade" (1,22%) e "Contrapressão" (0,36) indicou alta variação, sugerindo inconsistências no processo. A amplitude das variáveis, como "Perda por Umidade" e "Perda Medida", mostrou uma variabilidade considerável, com valores que podem impactar a eficiência do processo. Além disso, foi observada alta assimetria e curtose em variáveis como "Perda Medida" (assimetria de 2,108 e curtose de 10,128) e "Perda por Umidade" (assimetria de 10,048 e curtose de 123,427), sugerindo a presença de outliers, que merecem atenção, pois podem indicar falhas no processo ou condições extremas que necessitam de investigação mais detalhada, para comprovação, foi realizado o teste de outliers para cada variável utilizando a ferramenta *Minitab*, no qual pode ser visualizado nos gráficos presentes no apêndice A.

Hair et al. (2010) afirmam que valores de assimetria entre -2 e +2 são considerados adequados para validar uma distribuição normal, enquanto a curtose deve estar entre -7 e +7. Adicionalmente, Kline (2011) argumenta que um valor absoluto de assimetria superior a 3 e uma curtose acima de 10 podem sinalizar um possível problema, com valores acima de 20 indicando uma questão mais grave. Portanto, recomenda-se que os valores absolutos de assimetria e curtose não ultrapassem os limites de 3 e 10, respectivamente.

Como pode ser observado no Quadro 4, após a análise dos resultados obtidos, foi decidido realizar um segundo tratamento de dados, com o objetivo de melhorar a qualidade da amostra e reduzir a influência de outliers no processo. Para isso, foi filtrado o balanço de massa (Perda Medida) entre 1% e 3%, a fim de eliminar valores extremos que poderiam distorcer a análise e trazer resultados inconsistentes. Esse procedimento foi realizado para refinar a precisão da análise e garantir que os dados refletissem com mais fidelidade o comportamento típico do processo, sem a interferência de fatores atípicos. Os dados são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Resultados Segunda Filtragem

(Continua)

Medidas	Média	Mediana	Desvio-padrão	Amplitude	Assimetria	Curtose
Óleo Bruto Entrada (kg)	408232,24	406156,74	29620,38	132350,07	-0,14	-0,31
Vazão de Óleo Bruto (kg)	17009,68	16923,20	1234,18	5514,59	-0,14	-0,31
Umidade Óleo Bruto (%)	0,18	0,18	0,04	0,59	6,28	61,52
Acidez Óleo Bruto (%)	1,16	1,19	0,17	1,34	-1,10	1,52
Fósforo Óleo Bruto (ppm)	782,52	758,71	94,51	1111,47	0,97	0,84

Quadro 4 - Resultados Segunda Filtragem

(Conclusão)

Umidade da Goma (%)	57,46	58,05	3,89	63,66	-0,73	0,24
Teor de Óleo na Goma (%)	29,08	28,66	5,38	15,79	0,80	1,38
Umidade Óleo Degomado (%)	0,11	0,10	0,04	-16,20	0,97	0,74
Acidez Óleo Degomado (%)	0,97	1,00	0,20	1,43	-1,50	4,39
Sabões Óleo Degomado (ppm)	171,77	170,18	52,43	294,58	0,23	-0,69
Fósforo Óleo Degomado (ppm)	167,56	161,76	54,41	337,17	0,92	1,99
Nível do Reator (%)	72,20	73,55	8,83	19,33	-0,87	0,58
Temperatura do Reator (°C)	56,32	55,92	3,62	65,41	0,39	-0,63
Temperatura Separação (°C)	85,02	85,18	6,70	112,11	0,48	1,98
Dosagem de Água (%)	0,03	0,03	0,00	0,04	-0,40	-0,14
Dosagem de Enzima (ppm)	195,92	200,00	14,62	240,00	0,39	0,17
Dosagem de Soda (ppm)	172,42	180,00	35,47	240,00	-1,37	2,59
Diferença de Fósforo (ppm)	614,96	600,36	73,23	909,66	0,69	2,21
Perda Medida (%)	0,02	0,02	0,00	0,03	0,43	-0,68
Perda por Fósforo (%)	0,02	0,02	0,00	0,02	0,69	2,21
Perda por Umidade (%)	0,03	0,02	0,01	0,18	10,49	122,62
Contrapressão (bar)	2,52	2,50	0,40	4,57	1,45	6,24

Fonte: Autor (2024).

Com a aplicação dessa filtragem, as métricas de dispersão, como o desvio-padrão, a assimetria e a curtose, apresentaram mudanças significativas. O desvio-padrão da "Perda Medida" foi reduzido de 0,77% para 0,37%, evidenciando uma diminuição na variabilidade dos dados, o que confirma que a amostra filtrada é mais homogênea e representativa. A assimetria caiu de 2,108 para 0,435, indicando uma distribuição mais próxima da normalidade, com um comportamento mais equilibrado. Além disso, a curtose passou de 10,128 para -0,684, refletindo uma diminuição nas caudas pesadas da distribuição e a remoção dos outliers extremos, o que resulta em uma amostra mais estável e confiável.

Essas mudanças sugerem que a filtragem foi eficaz, melhorando a precisão e a

confiabilidade dos dados, o que, por sua vez, torna as conclusões mais robustas e adequadas para decisões gerenciais. A redução da dispersão e a normalização das distribuições indicam que o processo de degomagem se apresenta de forma mais controlada e estável, sem a influência de falhas ou condições extremas. Com esses dados refinados, o próximo passo consiste na análise correlacional, que permitirá entender melhor as relações entre as variáveis e os fatores que impactam o processo de degomagem.

4.2.2 Estatística Correlacional

Para a análise estatística correlacional, foram utilizadas as mesmas amostras coletadas nas etapas anteriores. A correlação entre as variáveis foi realizada utilizando o *Microsoft Excel*, que permitiu calcular o coeficiente de correlação de Pearson para identificar a força das relações entre as variáveis.

Para melhor visualização das correlações, foram organizadas as variáveis que mais impactam na tomada de decisão e suas correlações mais fortes, considerando apenas correlações médias e fortes. A análise pode ser observada no Quadro 5.

Quadro 5 – Correlações mais fortes com variáveis mais importantes.

(Continua)

Variável	Correlação	Magnitude
Perda Medida	Umidade da Lisogoma	Médio Negativa
	Teor de Óleo na Lisogoma	Médio Positiva
Fósforo de Óleo Degomado	Sabões Óleo Degomado	Médio Positiva
	Fósforo Óleo Bruto	Médio Positiva
	Acidez Óleo Bruto	Médio Negativa
Sabões Óleo Degomado	Fósforo Óleo Degomado	Médio Positiva
	Teor de Óleo na Lisogoma	Médio Negativa
	Fósforo Óleo Bruto	Médio Positiva
	Dosagem de Enzima	Médio Positiva
	Umidade da Lisogoma	Médio Positiva
	Temperatura de Reação	Médio Negativa
	Nível do Reator	Médio Positiva
	Dosagem de Água	Médio Positiva
	Umidade Pós-Separação	Médio Positiva
Umidade da Lisogoma	Teor de Óleo na Lisogoma	Forte Negativa
	Perda Medida	Médio Negativa
	Sabões Óleo Degomado	Médio Positiva
	Temperatura de Reação	Médio Negativa
	Acidez Óleo Degomado	Médio Positiva

Quadro 5 – Correlações mais fortes com variáveis mais importantes.
(Conclusão)

Umidade da Lisogoma	Nível do Reator	Médio Positiva
	Acidez Óleo Bruto	Médio Positiva
Teor de Óleo na Lisogoma	Umidade da Lisogoma	Forte Negativa
	Sabões Óleo Degomado	Médio Negativa
	Temperatura de Separação	Médio Negativa
	Perda Medida	Médio Positiva
	Nível do Reator	Médio Negativa
	Umidade Óleo Degomado	Médio Positiva
Diferença de Fósforo	Fósforo Óleo Bruto	Forte Positiva
	Acidez Óleo Bruto	Médio Negativa
	Acidez Óleo Degomado	Médio Negativa

Fonte: Autor (2024).

O quadro 5 revela diversas correlações entre variáveis do processo de degomagem enzimática. As correlações fortes positivas, como entre Diferença de Fósforo e Fósforo Óleo Bruto indicam que essas variáveis aumentam juntas, o que pode sugerir um aumento no fósforo bruto à medida que o delta de fósforo se eleva. Em contraste, Teor de Óleo na Lisogoma e Umidade da Lisogoma apresentam uma correlação forte negativa, sugerindo que o aumento da umidade nas gomas resulta em uma diminuição no Teor de Óleo na Lisogoma. A matriz de correlação pode ser visualizada no apêndice B.

Outras correlações médias, como entre Fósforo no Óleo Degomado e Sabões no Óleo Degomado, indicam que o fósforo e os sabões formam uma relação positiva moderada, o que pode refletir a produção de sabão à medida que o fósforo diminui no processo. Há também correlações negativas, como entre Acidez Óleo Bruto e Fósforo Óleo Bruto (-0,59), sugerindo que, quando a acidez dos ácidos graxos aumenta no óleo bruto, o fósforo diminui.

Além disso, a correlação entre Dosagem de Soda Cáustica e Temperatura de Reação (0,44) mostra uma relação positiva, indicando que uma dosagem de soda cáustica maior pode ser associada ao aumento da temperatura em uma parte do processo. O Dosagem de Enzima também se correlaciona positivamente com várias variáveis, como Sabões no Óleo Degomado (0,41) e Fósforo Óleo Bruto (0,31), indicando que a dosagem de enzimas está relacionada tanto à redução do fósforo quanto à formação de sabões.

Outras correlações negativas notáveis incluem Dosagem de Água com Temperatura do Reator (-0,37), o que pode indicar que uma maior dosagem de água está associada a temperaturas mais baixas, possivelmente impactando o processo de degomagem.

Em suma, as correlações sugerem diversas interações entre as variáveis do processo,

com algumas indicando uma relação direta, como a dosagem de enzimas e fósforo, enquanto outras indicam relações inversas, como a umidade nas gomas e Teor de Óleo na Lisogoma. Essas interações fornecem insights importantes para otimizar o processo de degomagem, ajustando variáveis-chave, como dosagens e temperatura, para melhorar a qualidade do óleo degomado ou rendimento do processo.

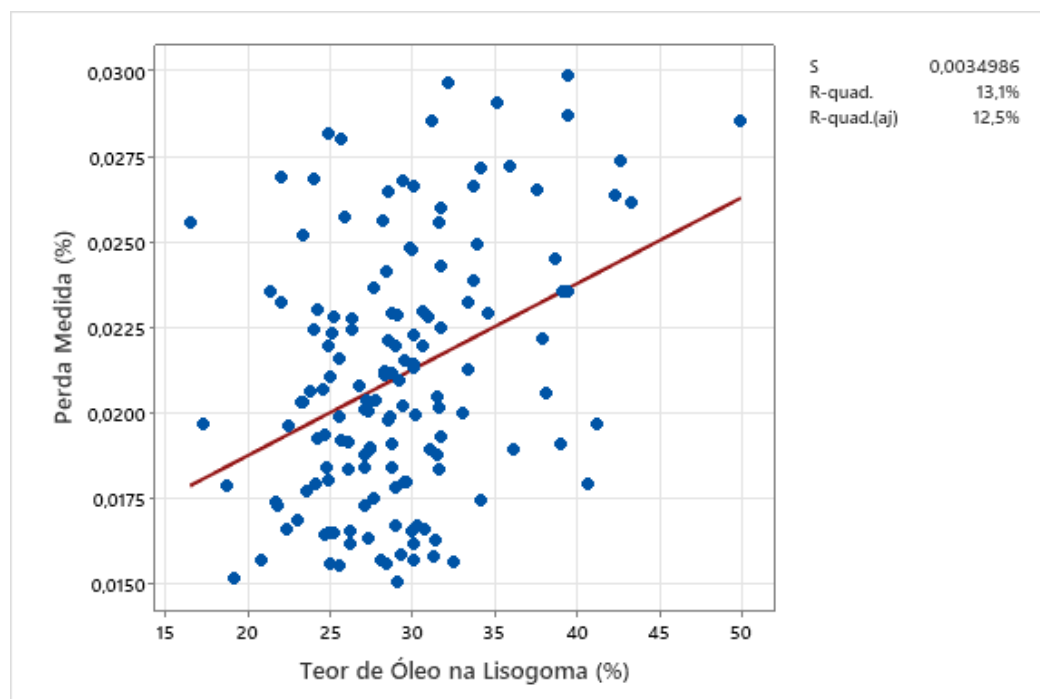
4.2.3 Regressão Linear

A regressão linear é uma ferramenta estatística utilizada para entender e quantificar as relações entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. O método é essencial para modelar processos industriais, pois permite prever o impacto de mudanças em variáveis operacionais sobre parâmetros de qualidade ou rendimento, orientando a tomada de decisões mais assertivas.

Neste estudo, foram realizadas regressões com as variáveis mais influentes no processo de degomagem enzimática de óleo de soja. Essas variáveis foram previamente identificadas por meio de análises descritivas e correlacionais. A escolha pela regressão linear justifica-se por sua capacidade de gerar modelos preditivos baseados em dados históricos, facilitando ajustes em fatores críticos e parâmetros operacionais.

O objetivo das regressões foi determinar como essas variáveis afetam métricas-chave, como a Perda Medida, Diferença de Fósforo e Qualidade da Lisogoma, auxiliando na identificação de estratégias para minimizar perdas, otimizar o rendimento e garantir a qualidade do produto. Esses resultados fundamentam decisões estratégicas que promovem maior eficiência e sustentabilidade no refino do óleo. Na Figura 7 e Figura 8 são observados o comportamento da variável Perda Medida em relação ao Teor de Óleo na Lisogoma e a Umidade de Óleo na Lisogoma, nas quais são as variáveis com maior correlação a Perda Medida.

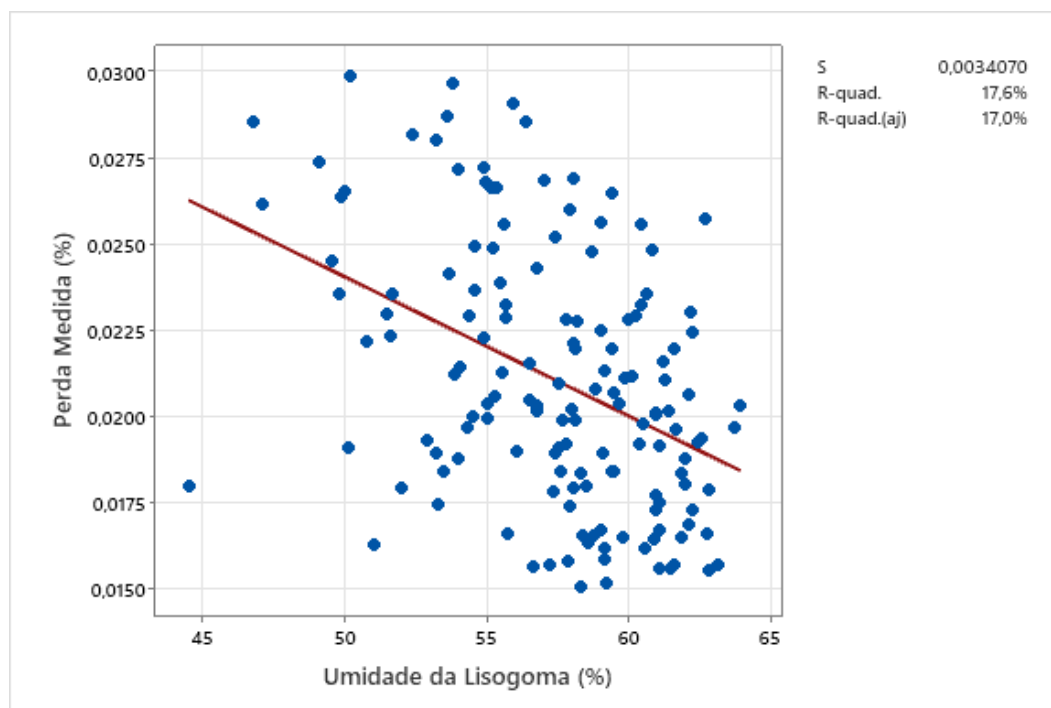
Figura 7 – Regressão Linear Perda Medida e Teor de Óleo na Lisogoma.



Fonte: Autor (2024).

Com esse resultado, pode ser analisado o comportamento da perda após o processo de separação, onde com um maior valor de óleo na lisogoma, obtém-se uma maior perda de processo, pois o óleo que devia ser mantido no processo é arrastado juntamente a lisogoma.

Figura 8 – Regressão Linear Perda Medida e Umidade da Lisogoma.



Fonte: Autor (2024).

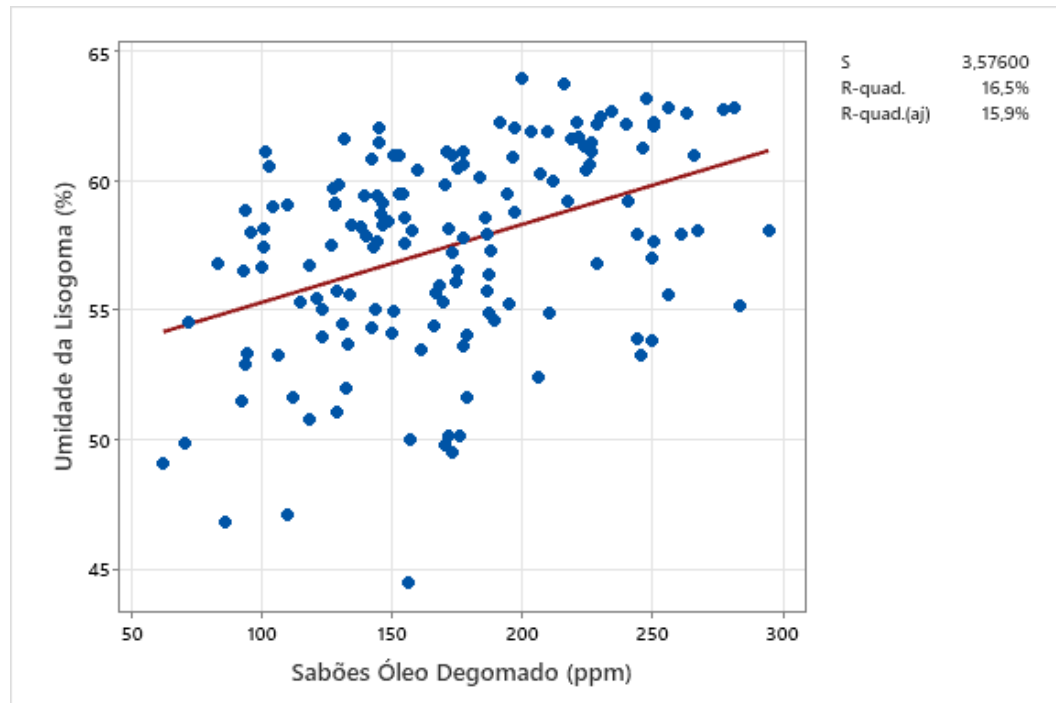
A análise de regressão linear entre a perda e a umidade da lisogoma evidencia a correlação com o teor de óleo presente na mesma. Esse comportamento pode ser explicado pela diferença de densidade entre óleo e água: como o óleo é mais leve, uma separação equilibrada que favoreça o arraste de uma maior quantidade de água resulta em menor retenção de óleo na lisogoma. Dessa forma, minimiza-se o arraste de óleo durante a separação, contribuindo para a redução das perdas no processo.

A fim de melhor compreensão das variáveis e do seu comportamento em relação aos parâmetros operacionais, foram realizadas as regressões entre a Umidade da Lisogoma e o Teor de Óleo na Lisogoma com suas variáveis maior correlacionadas incluindo Temperatura do Reator, Temperatura de Separação, Nível do Reator e Acidez do Óleo Bruto, comprovando assim as correlações feitas previamente. Também foram realizadas regressões utilizando as variáveis de qualidade do óleo degomado como Fósforo e Sabões do Óleo Degomado com as variáveis de Temperatura do Reator, Temperatura de Separação, Nível do Reator, Dosagem de Enzimas e Dosagem de Água.

Nas Figura 9 e Figura 10 são representadas as regressões entre o valor de Sabões no Óleo Degomado com a Umidade da Lisogoma e o Fósforo do Óleo Degomado com os Sabões no Óleo Degomado. Essa escolha se dá pela necessidade de um limite específico de sabões para venda de óleo degomado, a forte proporcionalidade entre a umidade da lisogoma e seu teor de

óleo e correlação entre o fósforo de saída com o valor de sabões de saída.

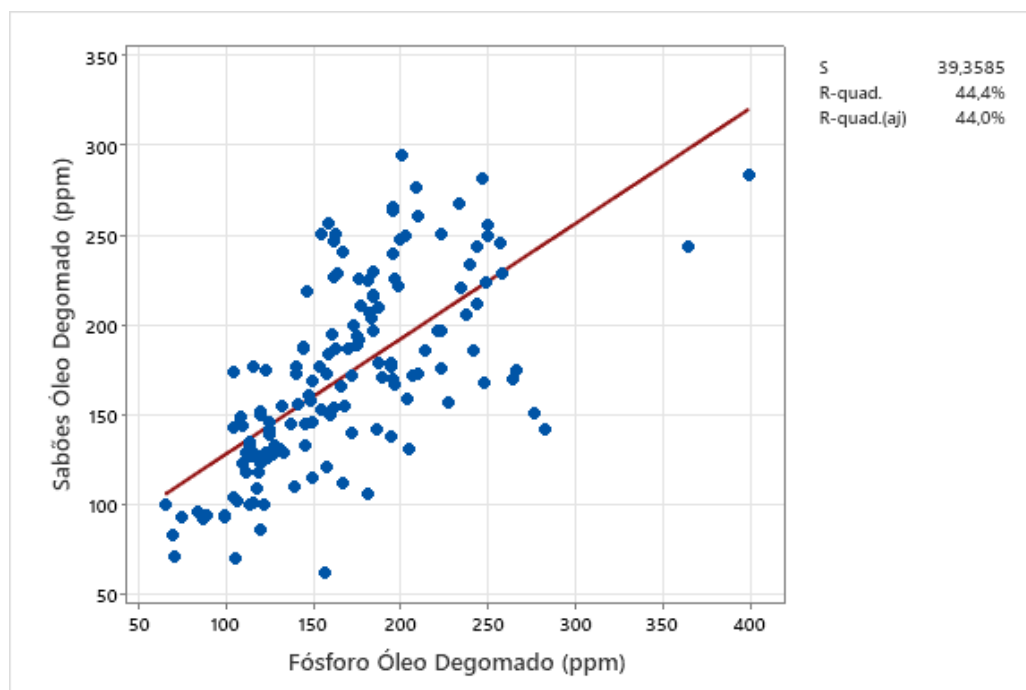
Figura 9 – Regressão Linear Umidade da Lisogoma e Sabões no Óleo Degomado.



Fonte: Autor (2024).

A figura 9 demonstra como o aumento de umidade na lisogoma pode aumentar o nível de sabões, sendo traduzido na forma como o aumento dessa umidade pode causar a saponificação do produto e atingir maiores teores de sabões.

Figura 10 – Regressão Linear Sabões no Óleo Degomado e Fósforo no Óleo Degomado.



Fonte: Autor (2024).

Como apresentado na figura 10, o valor de fósforo na saída do processo está ligado aos valores de sabões, onde ambos são contaminantes presentes no óleo, o que irá depender da etapa de separação para definir o quanto destes contaminantes serão arrastados.

Foram também realizadas regressões lineares entre todas as variáveis analisadas a fim de encontrar algum outro comportamento incomum, que no caso não foram relevantes para tomada de decisão.

Após a análise das regressões lineares entre as variáveis de interesse, nota-se que a correlação entre a Umidade da Lisogoma e Teor de Óleo na Goma é tão forte que se torna similar, de forma inversa, as correlações com outras variáveis. Também pode-se notar que o teor de fósforo no óleo mostrou um forte relacionamento apenas com o teor de sabões no óleo, o que pode ser utilizado como guia para o controle do fósforo no óleo degomado.

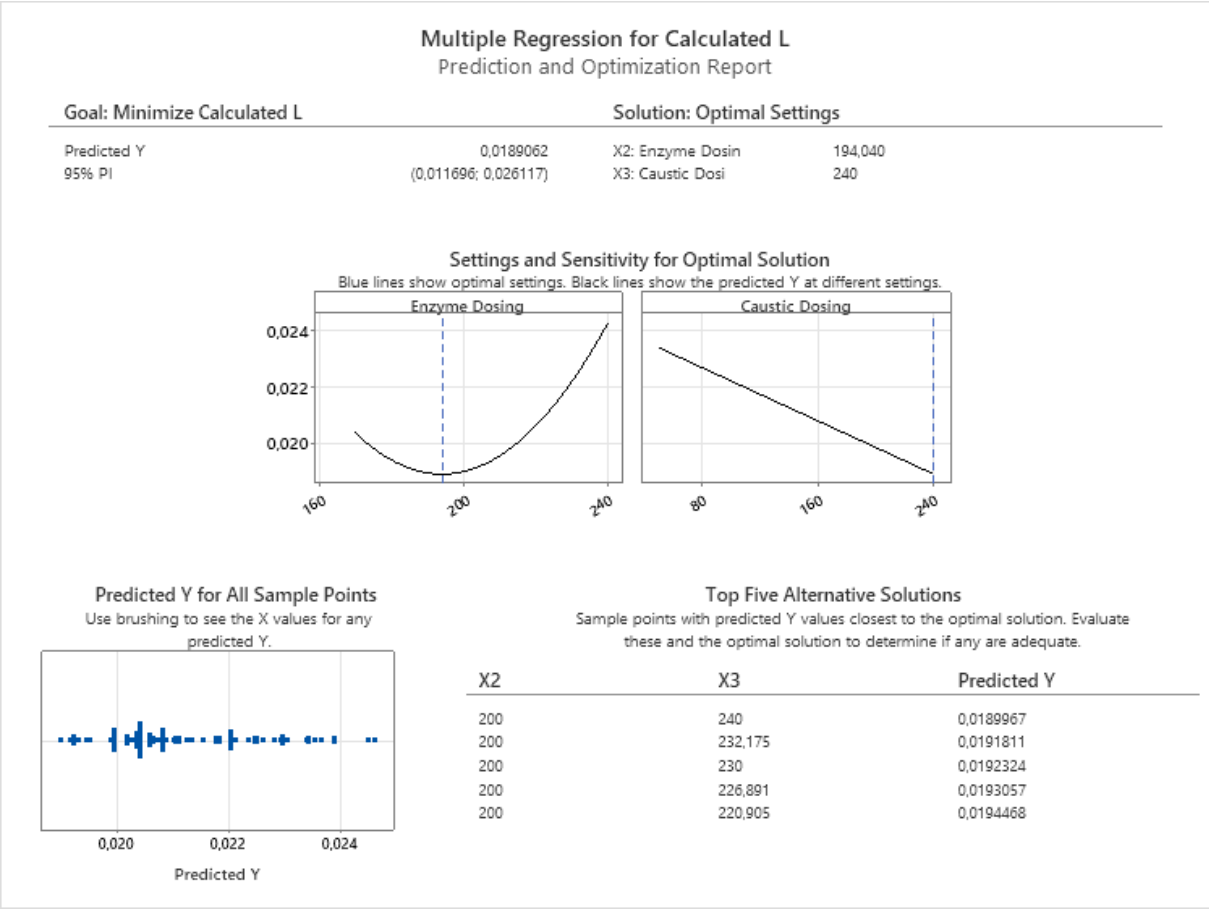
4.2.4 Regressão Múltipla

Por fim, compreendendo a forte correlação da Qualidade da Lisogoma com a Perda Medida e destas a correlação com parâmetros operacionais, foi realizado o método de Regressão Múltipla para encontrar configurações de processo que minimizariam a perda ou atingissem as especificações necessárias de Fósforo e Sabões do Óleo Degomado.

A Figura 11 é demonstrado uma previsão de configurações de Dosagem de Enzima e

Soda Cáustica para os melhores resultados de Perda Medida, se estabelecendo em um intervalo de 220 ppm a 240 ppm de Soda Cáustica e em 200 ppm de Enzima, apesar de seu gráfico demonstrar que é possível diminuir ainda mais a perda se a Dosagem de Enzima for maior. Nessa análise a Dosagem de Água não se mostrou relevante.

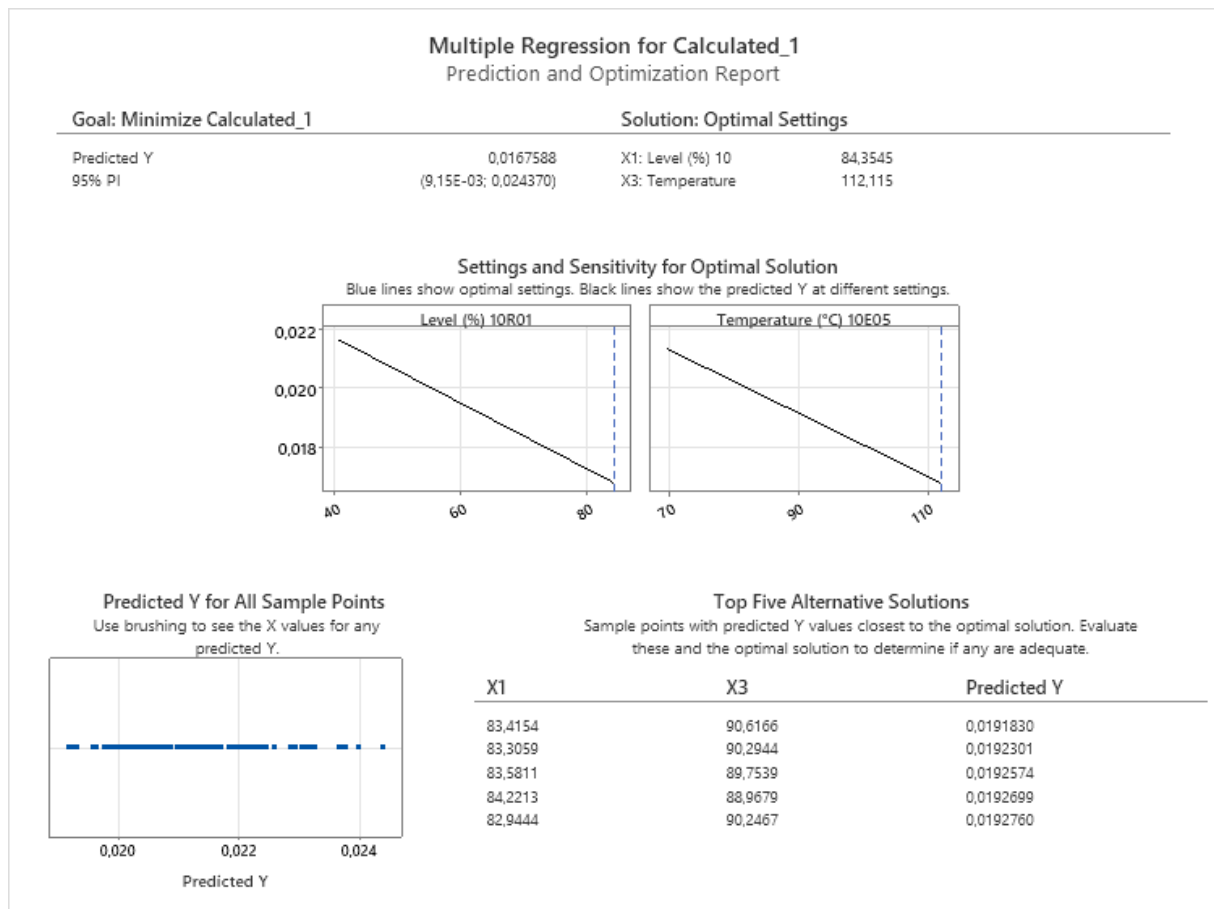
Figura 11 – Regressão Múltipla otimizando a Perda Medida com Dosagem de Enzima e Soda Cáustica.



Fonte: Autor (2024).

Diante disso, na Figura 12 é representa a mesma previsão para os parâmetros operacionais de Nível do Reator e Temperatura de Separação, demonstrando que quanto maior o nível e a temperatura, menor será a perda. Nessa análise a Temperatura de Reação não se mostrou relevante.

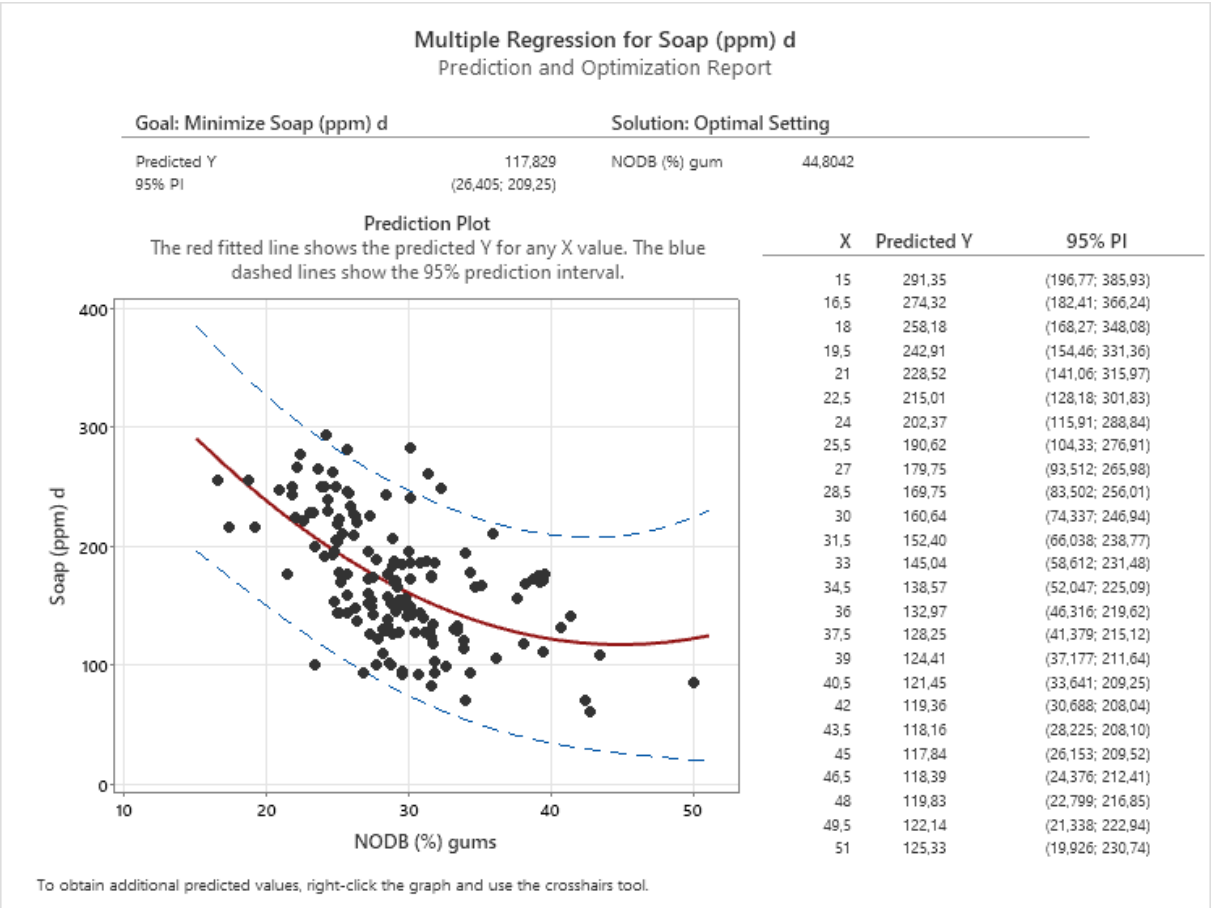
Figura 12 – Regressão Múltipla otimizando a Perda Medida com Nível do Reator e Temperatura de Separação.



Fonte: Autor (2024).

Foi realizada também a regressão múltipla para os valores de fósforo e sabões do óleo degomado, como pode ser observado na Figura 13 e Figura 14. A regressão demonstrou que ao aumentar o teor de óleo na goma ou aumentar sua umidade o resultado de fósforo e sabões se encontra ainda menor.

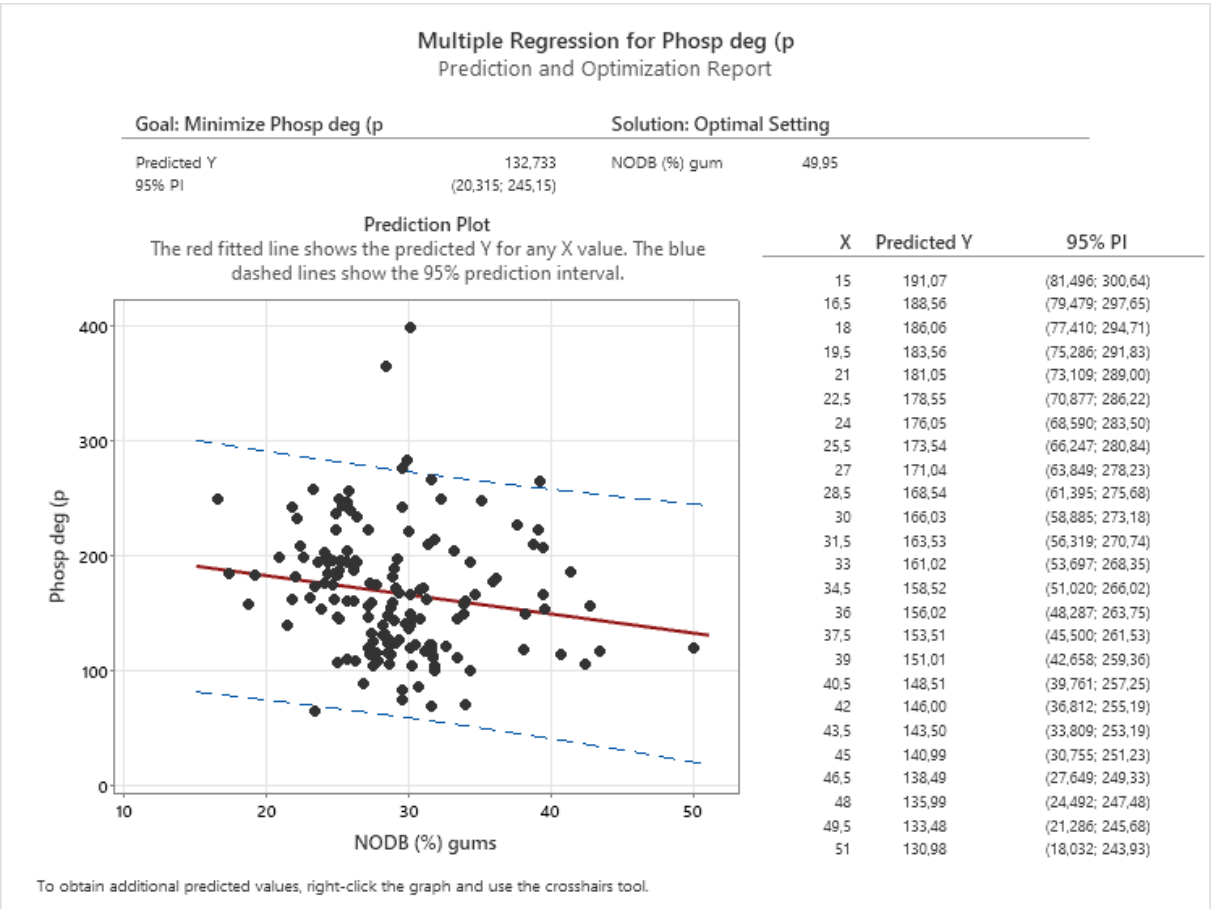
Figura 13 – Regressão Múltipla otimizando a os Sabões do Óleo Degomado com Teor de Óleo na Goma.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 13 apresenta melhores valores de sabões no óleo degomado à medida que reduzimos o teor de óleo na lisogoma, esta situação justifica o aumento da perda pelo objetivo de uma melhor qualidade do produto, sendo explicado que para uma melhor qualidade, deve-se aumentar o arraste de sabões e fósforo na centrífuga, o que gera também maior arraste de óleo para a lisogoma. O próprio software considerou a regressão não linear mais adequada para otimização da variável Y.

Figura 14 – Regressão Múltipla otimizando a o Fósforo do Óleo Degomado com Teor de Óleo na Goma.



Fonte: Autor (2024).

Após a análise das regressões múltiplas e a ferramenta de otimização do software Minitab, foi possível entender ainda mais a relação entre a Umidade da Lisogoma e o Teor de Óleo na Lisogoma, que foi apresentado pelo próprio software a irrelevância de analisar a previsão de valores de ambas, demonstrando o resultado apenas com o Teor de Óleo na Goma nas figuras 13 e 14.

Tal situação pode ser explicada pela maior correlação marginalmente distinta das variáveis com o Teor de Óleo na Goma que também pode ser explicada pela variabilidade nos resultados pelos métodos de análise e rotina laboratorial, o que não permite que a correlação das duas variáveis da lisogoma chegue a 1.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a análise detalhada dos resultados e a revisão do referencial teórico sobre o processo de degomagem enzimática e refino de óleo de soja pode-se observar que a relação entre a umidade da lisogoma e o teor de óleo na lisogoma é inversamente proporcional, sendo ambas variáveis fundamentais para as perdas do processo. Tais parâmetros são sensíveis à qualidade da matéria-prima e às configurações operacionais. Observou-se também que a redução de fósforo no óleo está diretamente correlacionada às perdas totais, pois o fósforo, ao compor a goma, torna sua remoção um fator crítico para o controle do rendimento.

Notou-se que os valores de sabões e fósforo no óleo degomado têm impacto negativo sobre a qualidade da lisogoma. Para garantir menores concentrações desses contaminantes, é necessário ajustar variáveis como dosagens e temperaturas, muitas vezes reduzindo o rendimento para alcançar o nível de qualidade desejado. Além disso, a qualidade inicial da matéria-prima influencia diretamente o processo: níveis elevados de fósforo, acidez ou sabões exigem maior esforço no refino, resultando em maiores perdas e necessidade de maior consumo de insumos.

A degomagem enzimática, com o uso de fosfolipase C, apresentou-se como uma alternativa promissora, pois transforma parte do fósforo residual em óleo, reduzindo as perdas em até 2% comparado a métodos convencionais. Essa inovação combina eficiência operacional com ganhos em sustentabilidade, diminuindo o uso de químicos e energia no processo. Diante disso, esta pesquisa poderá contribuir significativamente para o entendimento das interações entre variáveis de processo e perdas operacionais. Por conseguinte, demonstrou como ajustes nos parâmetros podem apoiar decisões estratégicas, seja para minimizar perdas, seja para atender especificações de qualidade em produtos intermediários.

Os resultados oferecem suporte à tomada de decisões gerenciais, fornecendo insights quantitativos sobre como as variáveis de processo influenciam o rendimento e a qualidade do óleo. Ao identificar fatores que podem ser ajustados, o estudo contribui para a implementação de melhorias que reduzem custos operacionais e aumentam a competitividade da indústria de óleo de soja. Assim, o estudo reforça o potencial da degomagem enzimática no aprimoramento da eficiência e qualidade no setor de óleos vegetais. Dessa forma, estimasse que este estudo poderá servir de base para iniciar estudos semelhantes.

A abordagem utilizando uma visão ampla do processo e suas variáveis pode dificultar a busca por melhorias incrementais, assim como a grande amostragem de dados pode apresentar

maiores variabilidade e desvios, dificultando o tratamento dos dados e a compreensão das relações entre as variáveis dependentes e independentes, por isso, fica como recomendação, o consideração em utilizar certas etapas do processo e suas variáveis em menor quantidade para estudo e aplicação de ajustes operacionais.

REFERÊNCIAS

- CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. **Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. 5. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2018.
- DE GREYT, W. **Processing oils and fats**. In: EDIBLE OIL PROCESSING. Wiley, 2013.
- DIJKSTRA, A. J. **Degumming, refining, and bleaching soybean oil**. AOCS Press, 2008.
- ERICKSON, D. R. **Practical handbook of soybean processing and utilization**. AOCS Press, 1995.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GUNSTONE, F. D. **Vegetable oils in food technology: Composition, properties, and uses**. Wiley-Blackwell, 2011.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate data analysis**. Pearson, 2009.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate data analysis**. 7. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2009.
- JUNG, S., et al. **Degumming processes in vegetable oil refining: A comparative study of enzymatic and chemical approaches**. Journal of Food Engineering, 2023.
- KIRSCHBAUM, J. **Process improvements in soybean oil refining**. Journal of the American Oil Chemists' Society, v. 77, n. 5, p. 507-513, 2000.
- KLINE, R. B. **Principles and practice of structural equation modeling**. 5. ed., pp. 3-427. New York: The Guilford Press, 2011.
- MIOT, H. A. **Análise de correlação em estudos clínicos e experimentais**. Jornal Vascular Brasileiro, v. 17, n. 4, p. 275–279, 2018.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2010.
- MOREAU, R. A. **Degumming and deacidification of soybean oil**. Elsevier, 2005.

NIELSEN, N. S. **Quality aspects in processing of edible oils**. Journal of Food Science, v. 76, n. 8, p. 634-642, 2011.

PANZA, R. J., et al. **Process optimization in soybean oil refining: Advances and challenges**. Industrial Crops and Products, 2022.

SHAHIDI, F. **Bailey's industrial oil and fat products**. John Wiley & Sons, 2005.

TYAGI, V. K.; VASISHTHA, A. K. **Changes in the characteristics and composition of oils during heating**. Journal of the American Oil Chemists' Society, v. 73, p. 499-506, 1996.

WEISS, N. A. **Introductory statistics**. 9. ed. Boston: Pearson, 2015.

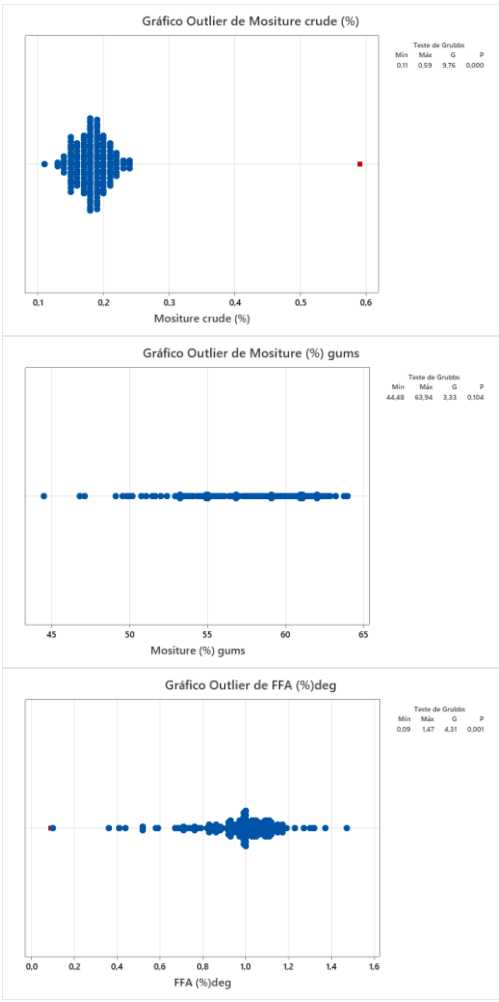
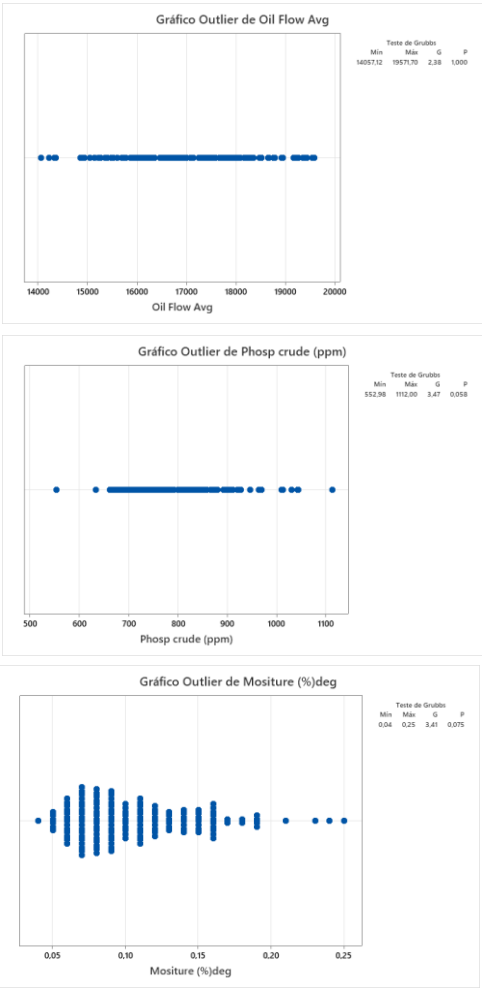
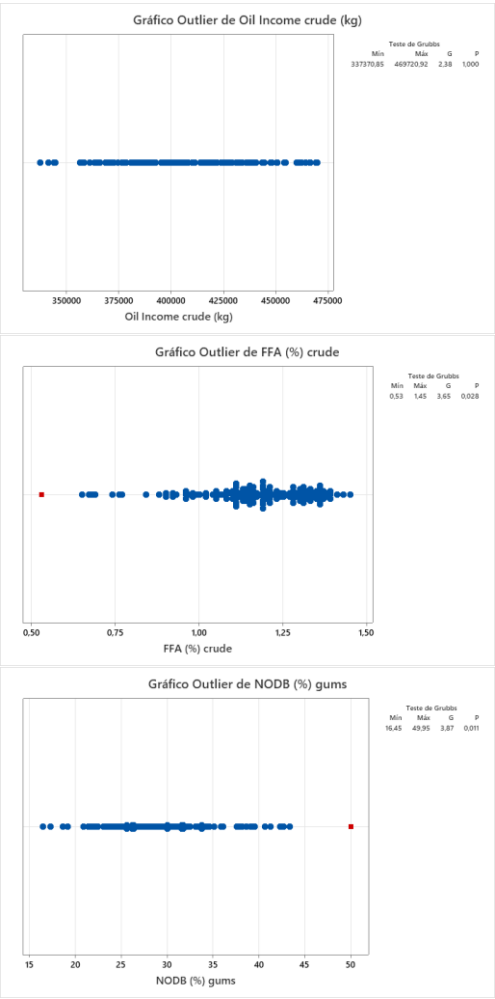
WU, X. **Degumming of vegetable oils using enzymes**. Journal of the American Oil Chemists' Society, v. 85, p. 579-587, 2008.

WU, Z., et al. **Study on the frying performance evaluation of refined soybean oil after PLC enzymatic degumming**. Foods, 2024.

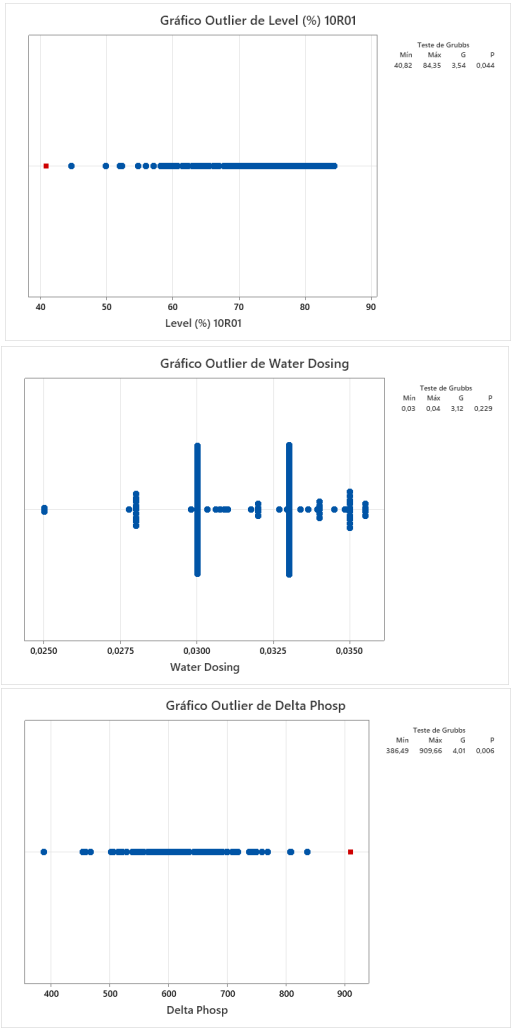
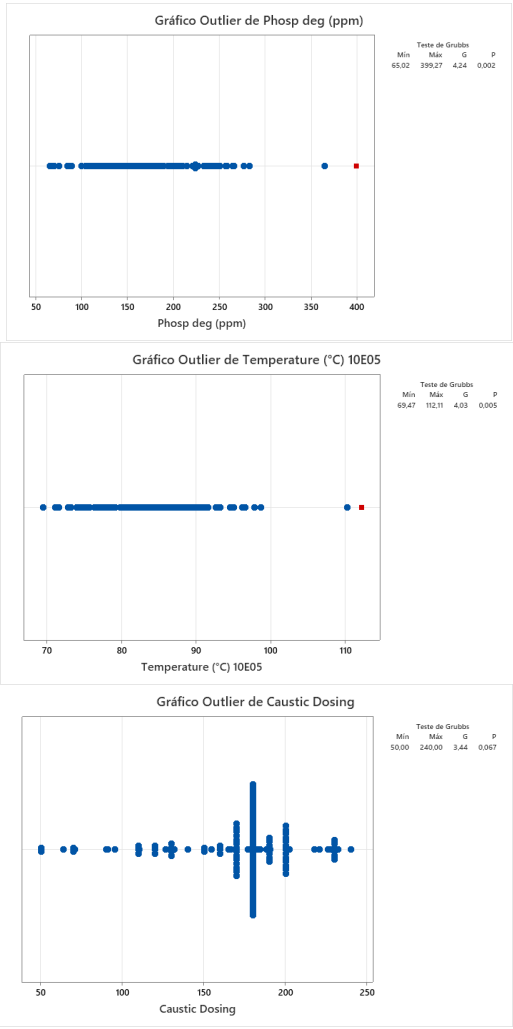
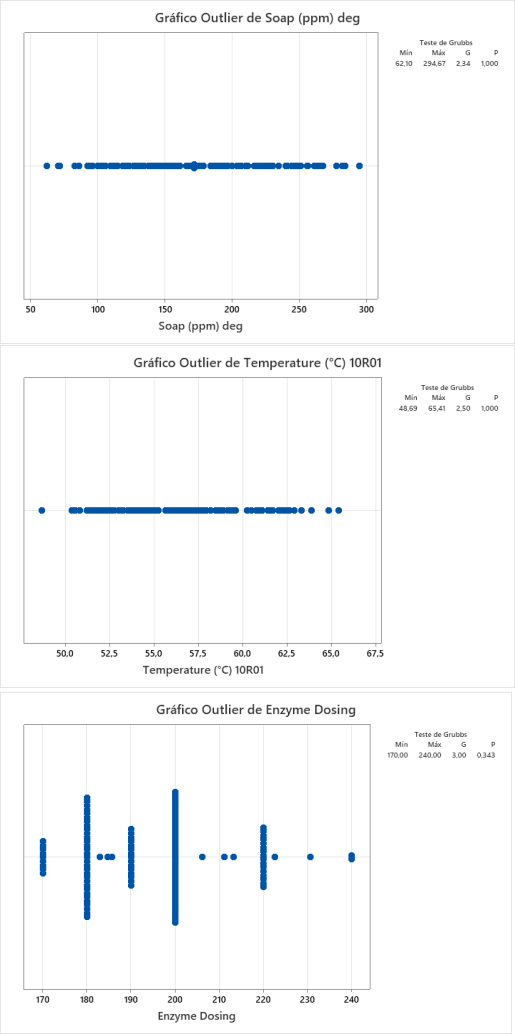
XU, X.; MU, H.; HØY, C.-E.; ADLER-NISSEN, J. **Enzymatic treatment of fats and oils: Application and functionalization**, 2011.

ZHANG, T., et al. **Application of enzymatic processes in oil degumming: A case study on soybean oil**. Food Chemistry, 2021.

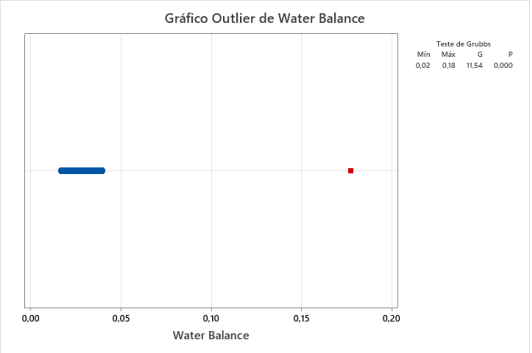
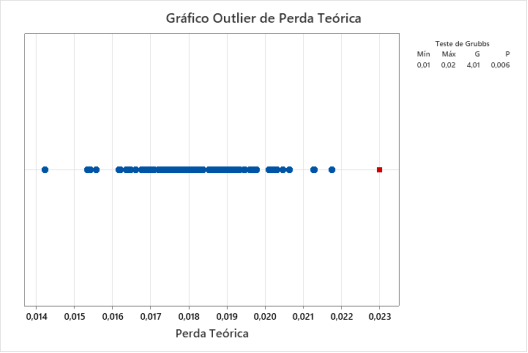
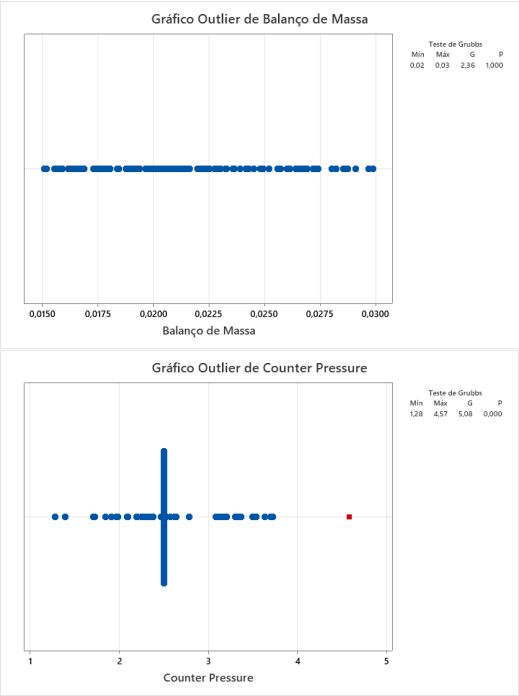
APÊNDICE A – TESTE DE OUTLIERS COM AS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ANÁLISE



APÊNDICE A – TESTE DE OUTLIERS COM AS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ANÁLISE



APÊNDICE A – TESTE DE OUTLIERS COM AS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ANÁLISE



APÊNDICE B – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS UTILIZADAS

	Oil Income	crucil Flow	Avire crude	A (%)	crup crude	(PH 10M01)	ire centdeg	(%)	gDB (%)	guiture (%)	FA (%)	deip (ppm)	isp deg	(ppl (%)	10lature	(°C)	ature	(°C)	ater Dosing	yme Dosing	ustic Dosing	elta Phosculat	Leorical	Loter	Balannter	Pressure
Oil Income crude (kg)	1,00																									
Oil Flow Avg	1,00	1,00																								
Mositure crude (%)	-0,03	-0,03	1,00																							
FFA (%) crude	0,03	0,03	0,01	1,00																						
Phosp crude (ppm)	-0,11	-0,11	0,04	-0,59	1,00																					
PH 10M01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00																				
Mositure centdeg (%)	0,01	0,01	0,11	-0,01	0,22	0,00	1,00																			
Mositure (%) gums	0,25	0,25	0,18	0,31	-0,18	0,00	-0,01	1,00																		
NODB (%) gums	-0,11	-0,11	-0,12	-0,28	-0,02	0,00	-0,17	-0,72	1,00																	
Mositure (%)deg	0,10	0,10	-0,12	-0,20	-0,02	0,00	-0,06	-0,20	0,31	1,00																
FFA (%)deg	0,20	0,20	0,02	0,59	-0,29	0,00	0,06	0,32	-0,30	0,03	1,00															
Soap (ppm) deg	0,17	0,17	0,08	-0,08	0,47	0,00	0,31	0,41	-0,54	-0,20	0,26	1,00														
Phosp deg (ppm)	-0,06	-0,06	0,14	-0,43	0,63	0,00	0,27	0,05	-0,17	0,07	-0,03	0,67	1,00													
Level (%) 10R01	0,33	0,33	-0,10	0,11	0,00	0,00	0,07	0,32	-0,32	-0,17	0,20	0,35	-0,03	1,00												
Temperature (°C) 10R01	-0,18	-0,18	-0,04	-0,11	-0,05	0,00	-0,04	-0,40	0,21	0,06	-0,37	-0,40	-0,16	-0,29	1,00											
Temperature (°C) 10E05	-0,07	-0,07	0,13	-0,04	0,14	0,00	0,02	0,25	-0,40	-0,11	-0,13	0,04	-0,05	-0,18	0,14	1,00										
Water Dosing	0,22	0,22	0,13	-0,10	0,13	0,00	-0,06	0,28	-0,13	0,03	0,23	0,35	0,24	0,29	-0,37	-0,20	1,00									
Enzyme Dosing	0,19	0,19	0,01	-0,06	0,31	0,00	0,24	0,19	-0,17	0,11	0,08	0,41	0,26	0,31	-0,36	0,15	0,17	1,00								
Caustic Dosing	0,15	0,15	-0,04	0,26	-0,16	0,00	0,04	0,26	-0,24	-0,01	0,16	0,02	-0,20	0,13	0,01	0,44	0,02	0,41	1,00							
Delta Phosp	-0,10	-0,10	-0,05	-0,45	0,82	0,00	0,09	-0,27	0,10	-0,08	-0,36	0,11	0,08	0,02	0,05	0,21	-0,01	0,21	-0,06	1,00						
Calculated Loss	-0,12	-0,12	0,07	-0,26	0,29	0,00	-0,07	-0,42	0,36	0,13	-0,19	-0,08	0,20	-0,23	0,13	-0,14	0,00	0,00	-0,23	0,22	1,00					
Theoretical Loss	-0,10	-0,10	-0,05	-0,45	0,82	0,00	0,09	-0,27	0,10	-0,08	-0,36	0,11	0,08	0,02	0,05	0,21	-0,01	0,21	-0,06	1,00	0,22	1,00				
Water Balance	-0,13	-0,13	0,03	-0,04	0,07	0,00	-0,04	-0,26	0,24	0,03	-0,07	-0,06	0,08	-0,01	0,10	-0,11	0,14	0,05	-0,07	0,04	0,23	0,04	1,00			
Counter Pressure	0,12	0,12	0,16	0,01	0,19	0,00	0,13	0,16	-0,23	-0,26	-0,01	0,17	0,02	0,17	-0,04	0,20	-0,07	0,12	0,03	0,23	-0,15	0,23	0,11	1,00		