



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE LUÍS EDUARDO MAGALHÃES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

TAÍS DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DA *FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS* (FMEA) PARA
IDENTIFICAR GARGALOS NO USO DA EXPANDER NO PROCESSO DE
ESMAGAMENTO DE SOJA**

LUÍS EDUARDO MAGALHÃES - BA

2025

TAÍS DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DA *FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS* (FMEA) PARA
IDENTIFICAR GARGALOS NO USO DA EXPANDER NO PROCESSO DE
ESMAGAMENTO DE SOJA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Armando Dias Duarte

LUÍS EDUARDO MAGALHÃES - BA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

O48 Oliveira, Taís de.

Utilização da Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) para identificar gargalos no uso da expander no processo de esmagamento de soja. / Taís de Oliveira. – 2025.

54 f.; il. color.

Orientador: Prof. Dr. Armando Dias Duarte.

Trabalho de Conclusão de Curso: (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães, Luís Eduardo Magalhães, BA, 2025.

1. Agricultura – Processos de Produção. 2. Agronegócio – processamento de grãos. 3. Soja – Esmagamento.

I. Duarte, Armando Dias. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães. III. Título.

CDD: 633.34

BIBLIOTECAS UFOB - Biblioteca Universitária de Luís Eduardo Magalhães

TAÍS DE OLIVEIRA


**UTILIZAÇÃO DA FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) PARA
IDENTIFICAR GARGALOS NO USO DA EXPANDER NO PROCESSO DE
ESMAGAMENTO DE SOJA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro
Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães, como
requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira
de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Armando Dias Duarte

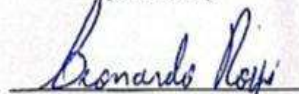
Aprovada em 16/06/25

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Armando Dias Duarte

(Orientador)



Prof. Msc. Leonardo Rospi

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA



Prof. Dr. Adriano David Monteiro de Barros

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me permitir alcançar este momento tão significativo. Em seguida, à minha família, pelo apoio e amor incondicional ao longo dos anos e por sempre me guiarem pelo caminho certo.

Aos amigos durante essa trajetória, deixo meu sincero agradecimento por cada palavra de incentivo, por cada momento compartilhado e por serem fundamentais na construção dessa conquista.

Estendo meus agradecimentos à Universidade, ao corpo docente que contribuíram para meu desenvolvimento, e, em especial, ao meu orientador, pela paciência, disponibilidade e apoio ao longo deste trabalho.

Aos operadores, supervisores e minha gestora da planta II por terem me ensinado com excelência todo o processo sendo possível a realização desse estudo, minha eterna gratidão.

RESUMO

O agronegócio brasileiro desempenha um papel estratégico na economia nacional, com destaque para a produção de soja, que impulsiona diretamente o processamento industrial voltado à extração de óleo e subprodutos. Dentro do processo de esmagamento da soja, a etapa de preparação em especial a operação da Expander é fundamental para garantir maior rendimento e eficiência operacional. Diante da relevância desse equipamento, este trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) para identificar e mitigar os modos de falha críticos da *Expander*. A pesquisa envolveu o mapeamento do processo, o levantamento de falhas e, por fim, a elaboração de um plano de ações corretivas e preventivas, com foco na redução de paradas não programadas e na promoção da melhoria contínua. Para isso, foram conduzidas entrevistas semiestruturadas com profissionais experientes, observações in loco ao longo de um ano e a aplicação da FMEA com base nos critérios de ocorrência, detecção e severidade. Os resultados apontam que a *Expander* apresenta falhas recorrentes, muitas delas associadas a problemas de projeto, que impactam diretamente a continuidade do processo produtivo e os custos operacionais. A pesquisa contribui para a compreensão detalhada do sistema e oferece subsídios para melhorias no desempenho do equipamento.

Palavras-chave: FMEA; Processo industrial; Manutenção preventiva e preditiva.

ABSTRACT

Brazilian agribusiness plays a strategic role in the national economy, with emphasis on soybean production, which directly drives industrial processing aimed at extracting oil and byproducts. Within the soybean crushing process, the preparation stage, especially the operation of the Expander, is essential to ensure greater yield and operational efficiency. Given the relevance of this equipment, this study aims to apply the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) methodology to identify and mitigate the critical failure modes of the Expander. The research involved mapping the process, identifying failures and, finally, developing a corrective and preventive action plan, focusing on reducing unscheduled downtime and promoting continuous improvement. To this end, semi-structured interviews with experienced professionals, on-site observations over the course of a year and the application of FMEA based on occurrence, detection and severity criteria were conducted. The results indicate that the Expander presents recurring failures, many of them associated with design problems, which directly impact the continuity of the production process and operational costs. The research contributes to a detailed understanding of the system and provides support for improvements in equipment performance.

Keywords: FMEA; Industrial process; Preventive and predictive maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma metodológico	21
Figura 2: Etapas do Processo de Produção da Soja.....	25
Figura 3 - Estrutura interna do Moinho de quebra	27
Figura 4 – Estrutura externa do Moinho de quebra.....	28
Figura 5 - Sistema de aspiração de casca	29
Figura 6 - Funcionamento da coluna de separação	29
Figura 7 - Condicionador rotativo	30
Figura 8 - Laminador.....	31
Figura 9 - Componentes da Expander	33
Figura 10 – Esquema do processo de extração do óleo.....	34
Figura 11: Framework de ações de melhorias para os RPN elevados	40

LISTA DE QUADRO

Quadro 1: Critério de análise e sistema de ranqueamento para a ocorrência da falha.....	22
Quadro 2: Critério de análise e sistema de ranqueamento para a detecção da causa da falha	22
Quadro 3: Critério de análise e sistema de ranqueamento para a severidade (gravidade) dos efeitos da falha.....	23
Quadro 4 – FMEA do estudo	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVO GERAL.....	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	11
1.2. JUSTIFICATIVA.....	11
1.2.1 Trabalhos relacionados com a temática	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 O papel da indústria de beneficiamento da soja	15
2.2 <i>Failure Mode and Effects Analysis</i> (FMEA)	17
3.2.1 Aplicação do FMEA	18
3 METODOLOGIA.....	20
3.1 Apresentação da empresa.....	23
4.2 Descrição do processo	24
4.2.1 O processo de armazenamento dos grãos.....	26
4.2.2 O processo de preparação dos grãos	26
4.2.3 Quebra dos grãos.....	27
4.2.4 Separação de casca.....	28
4.2.5 A etapa do condicionamento.....	30
4.2.6 O processo de Laminação	31
4.2.7 Expansão da massa.....	32
4.2.8 Extração do óleo.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1 Medidas para Mitigação da Obstrução na bica da expander	40
5.2 Medidas para Mitigação da Obstrução no corpo da expander.....	41
5.3 Medidas para Mitigação de Falhas mecânicas na expander	42
5.4 Medidas para Mitigação de falhas externas na expander	43
5 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio desempenha um papel fundamental na economia global, contribuindo para o desenvolvimento econômico e a segurança alimentar. No Brasil, em 2024, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, 2024) o setor representou 21,8% do Produto Interno Bruto (PIB), sendo responsável por uma parcela significativa da geração de empregos, receitas e desenvolvimento regional. Dentro desse cenário, destaca-se o cultivo da soja, uma das principais *commodities* brasileiras, cuja produção de acordo a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2024) é estimada em 164,9 milhões de toneladas até 2030. Esse crescimento impulsiona diretamente o processamento do grão devido à alta demanda das indústrias de esmagamento, que transformam a soja em produtos e subprodutos. (Gaffeld, 2021; Rodrigues, 2024).

A indústria de extração de óleo vegetal é composta por duas etapas principais, cada uma com subetapas específicas que afetam diretamente a eficiência do processo. A primeira etapa, denominada preparação, envolve processos como secagem, aquecimento e descamação das sementes (Ghoui *et al.*, 2018). Essa fase é essencial, pois promove a quebra da estrutura celular das sementes, o que facilita a extração do óleo nas etapas subsequentes (Ghoui *et al.*, 2018; Claux *et al.*, 2023). Entre as subetapas da preparação, destaca-se a expansão da massa de soja, considerada uma das mais relevantes para maximizar o desempenho e rendimento industrial (Gaffeld, 2024). Essa etapa é realizada por meio do equipamento conhecido como *Expander*, que submete a soja a condições específicas de temperatura, umidade e pressão, promovendo alterações significativas em suas propriedades físicas. Como resultado, há um aumento da porosidade e densidade do material, o que facilita a ruptura celular e melhora a difusão do solvente durante a extração, elevando o rendimento e a eficiência do processo como um todo (Yingsun *et al.*, 2023). Além disso, a utilização da *Expander* contribui para a redução do consumo de energia e solventes nas etapas seguintes, além de favorecer a estabilidade do processo produtivo (Bogalhos, 2022).

Diante da importância dessa operação no desempenho global da planta, a escolha da *Expander* como objeto deste estudo se justifica por sua relevância operacional e estratégica no contexto industrial, uma vez que impacta diretamente as etapas subsequentes, influenciando o rendimento da extração, a eficiência energética e a produtividade da unidade. Compreender suas limitações, falhas recorrentes e potenciais melhorias é essencial para garantir maior confiabilidade e estabilidade ao processo, além de possibilitar a identificação de gargalos operacionais e a proposição de soluções que assegurem o pleno aproveitamento dos benefícios

proporcionados por sua utilização. Estudos como o de Yingsun *et al.*, (2023); Kumar *et al.*,(2021) destacam que a Expander, ao otimizar as condições de temperatura, umidade e pressão, melhora significativamente a estrutura do material, elevando a eficiência da difusão do solvente e, conseqüentemente, o rendimento da extração, a implementação de tecnologias que aumentam a eficiência na extração de óleo vegetal é uma prática essencial para assegurar a competitividade industrial e a viabilidade econômica, além de atender às crescentes demandas por processos mais sustentáveis.

Ademais, considerando o aumento da demanda por alimentos e a projeção de crescimento populacional para as próximas décadas, a eficiência dos processos industriais, especialmente na indústria de alimentos, torna-se não apenas desejável, mas urgente. De acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2023), a produção de alimentos precisará crescer em cerca de 60% até 2050 para atender à população mundial estimada em 9,7 bilhões de pessoas. Essa projeção reforça a necessidade de aprimorar cada etapa do processamento, garantindo que perdas sejam minimizadas e que recursos como energia e solventes sejam utilizados de forma mais racional. Ainda, segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2024), a soja desempenha papel central na produção de óleos e farelos vegetais, sendo vital para o abastecimento de proteínas e energia em diversas cadeias produtivas.

1.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar o *Failure Mode And Effects Analysis* (FMEA) na identificação das principais causas de falhas em uma Expander dentro da etapa da preparação da massa de soja em uma empresa multinacional.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar o mapeamento do processo onde o equipamento está localizado;
- Levantar as principais causas que contribuem com a ineficiência do processo;
- Avaliar as causas e efeitos dessas falhas sobre o processo produtivo
- Desenvolver um plano de ação preventivo e corretivo para minimizar as anomalias;

1.2. JUSTIFICATIVA

Em um contexto de segurança alimentar e pressões ambientais cada vez mais significativas, não há espaço para desperdícios ou ineficiências, tornando fundamental o investimento em

melhorias tecnológicas e operacionais, como as proporcionadas pela Expander, que impacta diretamente a capacidade produtiva e a sustentabilidade do setor. Dessa forma, a análise cuidadosa de seu desempenho e a busca por soluções que mitiguem falhas ou gargalos tornam-se estratégias prioritárias para assegurar o atendimento à demanda futura de alimentos, mantendo a competitividade industrial e contribuindo para a redução dos impactos ambientais. Além disso, considerando a relevância da etapa de expansão e a necessidade de aumentar a sua eficiência e confiabilidade, torna-se fundamental a adoção de ferramentas da gestão da qualidade que permitam identificar e priorizar as falhas que podem comprometer o desempenho da Expander e, conseqüentemente, de toda a unidade industrial. Nesse contexto, destaca-se a ferramenta *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), que tem se consolidado como uma metodologia essencial para identificar, analisar e tratar potenciais falhas em processos críticos (García, 2023). Essa abordagem possibilita não apenas a detecção de pontos vulneráveis, mas também a priorização de ações corretivas e preventivas, alinhando-se ao objetivo de mitigar desperdícios, otimizar recursos e atender às demandas cada vez mais rigorosas do setor de alimentos.

Diante disso, o problema de pesquisa que norteia este trabalho pode ser formulado da seguinte maneira: Como a aplicação do FMEA pode contribuir para identificar e mitigar modos de falha críticos na Expander, visando aumentar a confiabilidade e o desempenho do processo de esmagamento de soja? Essa questão orienta o desenvolvimento do estudo, buscando responder de forma clara e objetiva os desafios operacionais enfrentados na etapa de expansão. Este trabalho, portanto, busca a aplicação da FMEA para identificar, analisar e priorizar os modos de falha associados a Expander, avaliando as causas das falhas, seus efeitos sobre o desempenho do equipamento e suas conseqüências no processo produtivo. A partir dessa análise, serão propostas ações corretivas e preventivas que contribuam para a mitigação dos riscos, o aumento da confiabilidade operacional e a melhoria contínua do desempenho do equipamento. A aplicação do FMEA permitirá uma abordagem sistemática e estruturada na tomada de decisões, com foco na redução de custos, na otimização da produção e no prolongamento da vida útil do Expander, assegurando que este atenda às necessidades da unidade industrial.

1.2.1 Trabalhos relacionados com a temática

Sobre a aplicação da ferramenta, foram identificados alguns trabalhos como, Já Zhan *et al.* (2024) que realizaram um estudo para identificar preventivamente as falhas potenciais do sistema de registros médicos eletrônicos (EMRs) na China e suas causas e efeitos para evitar que as falhas se repitam, buscando implementação de melhorias para minimizar as falhas do

sistema, a partir do FMEA realizado por 10 especialistas durante dois anos e cinco meses. O estudo resultou na definição de dois processos e seis subprocessos para melhorar o sistema, além da identificação de sete causas principais para os modos de falha. Após a implementação das melhorias, foi observada uma redução significativa das falhas.

Miranda *et al.* (2024) evidenciaram, em seu estudo, a aplicação da ferramenta FMEA para o gerenciamento de riscos no processo de produção, com foco em uma empresa do segmento de tecnologia. A metodologia adotada foi a pesquisa bibliográfica, baseada em fontes já publicadas, como livros, artigos e dissertações, a fim de contextualizar a aplicação do FMEA. Além disso, o estudo utilizou um estudo de caso descritivo, voltado para a análise detalhada das falhas no processo de montagem de equipamentos. A aplicação da ferramenta permitiu o mapeamento das falhas e a definição de medidas corretivas, com o objetivo de reduzir a ocorrência dessas falhas e seus impactos, com ênfase na confiabilidade e na melhoria contínua do processo produtivo. A pesquisa demonstrou que a utilização do FMEA é crucial para aprimorar a gestão da qualidade nos processos industriais, contribuindo para a redução de retrabalhos, atrasos e reclamações de clientes, bem como para a minimização de custos.

Santos *et al.* (2024) destacaram em seu estudo a aplicação do FMEA no contexto da usinagem de grande escala, realizando um mapeamento detalhado de cada etapa do processo para identificar modos de falha, seus efeitos e causas potenciais. Com a utilização dessa ferramenta, foi possível detectar e minimizar falhas potenciais, resultando em melhorias significativas na estabilidade e precisão de etapas cruciais, como desbaste, furação e acabamento. A adoção de medidas preventivas, como ajustes nas tolerâncias das peças e o uso de ferramentas específicas, permitiu reduzir o RPN total de 1539 para 1197, o que representa uma diminuição de 22% na probabilidade de falhas. O estudo contribuiu para a otimização dos processos de fabricação, impactando diretamente a qualidade do produto final, a confiabilidade do conjunto e promovendo práticas mais sustentáveis, além de oferecer valiosos insights tanto para a academia quanto para a indústria.

Costa *et al.* (2022) realizaram um estudo de caso sobre a aplicação do FMEA em uma empresa de recicláveis, com o objetivo de analisar a confiabilidade do sistema logístico de transporte. A pesquisa foi conduzida em três etapas: levantamento de dados, análise de confiabilidade e elaboração do FMEA para calcular o RPN, a fim de priorizar as ações corretivas. A partir desses resultados, a equipe de engenharia da empresa definiu ações corretivas, incluindo a implementação de um plano de inspeção, o mapeamento de rotas, a utilização de sistemas de localização digital e a melhoria na conferência dos produtos. Tais medidas visaram reduzir as falhas mais recorrentes e melhorar a eficiência do processo

logístico. A aplicação da metodologia FMEA no setor logístico da empresa permitiu a identificação e priorização das falhas mais críticas, além de possibilitar a avaliação da confiabilidade dos transportes. O estudo contribuiu para tornar os serviços logísticos da empresa mais confiáveis e eficientes, evitando impactos negativos para os clientes e promovendo a melhoria contínua no processo.

Gupta *et al.* (2022) realizaram um estudo sobre a cadeia de suprimentos de milho nos EUA, utilizando análise de árvore de falhas (FTA) e o FMEA para identificar fatores que contribuem para a presença de adventícios (AP) em cadeias de produtos geneticamente modificados. O estudo mapeou a cadeia de suprimentos e classificou os fatores com base em dados qualitativos e quantitativos, revelando as causas raiz do AP. A priorização com FMEA destacou os fatores mais críticos e com maior probabilidade de ocorrência, permitindo direcionar recursos de forma eficiente para reduzir os níveis de AP, com foco nos fatores de maior RPN para reduzir os níveis de AP, em vez de dispersar os recursos entre todos os fatores.

Também Fereng e Benedik (2021) destacaram na pesquisa exploratória uma proposta de processo metodológico para acompanhar o consenso em nível de grupo quanto à classificação dos riscos de conformidade, por meio da coleta de dados primários em um grande banco da Europa Central e Oriental, com a participação de especialistas. O estudo sugeriu que a similaridade ou diferença nos padrões de avaliação são quantificadas para fornecer *feedbacks* objetivos. Propõe também considerar a detectabilidade de falhas com a mesma importância da probabilidade e impacto da não conformidade, usando métodos estatísticos de concordância. A aplicação da metodologia FMEA mostrou ser eficaz para monitorar o acordo entre especialistas e identificar insights sobre diferentes interpretações dos riscos.

Kardos e Lahuta (2021) realizaram uma pesquisa focada na modificação da aplicação do método FMEA para a organização de eventos de corrida, com o objetivo de melhorar a segurança e a qualidade das maratonas, evidenciando a aplicabilidade do FMEA em equipe utilizando conhecimento de vários especialistas de diferentes áreas, com o uso do FMEA foi possível a melhoria contínua dos eventos em termos de segurança e qualidade, sendo possível tomada de decisões para gerenciamento dos riscos.

Magalhães e Lima Junior (2021) desenvolveram uma pesquisa empírica quantitativa normativa utilizando as metodologias FMEA e *Fuzzy-TOPSIS* para apoiar a priorização de riscos em processos de produção industrial. A aplicação piloto foi conduzida em um processo de fusão e vazamento de ferro nodular, com o objetivo de identificar e classificar os riscos de falhas potenciais, com base na avaliação de quatro especialistas da empresa. Os resultados indicaram as falhas que requerem maior atenção e prioridade. A análise de sensibilidade

confirmou a importância dessas falhas, destacando também o impacto da variação dos pesos atribuídos aos critérios. O modelo proposto se mostrou eficaz no apoio à formulação de planos de ação voltados à minimização ou eliminação das falhas mais críticas.

No contexto da segurança do trabalho Cavaignac *et al.* (2020) conduziram uma pesquisa na execução de manutenção em redes de abastecimento de água em uma cidade do Maranhão, utilizando registros fotográficos feitos no local. A partir dessas observações, foram identificadas possíveis falhas e aplicados os princípios do FMEA, abordando modos de falha, efeitos, métodos de detecção, ações corretivas e cálculo do RPN. O estudo evidenciou a aplicação do FMEA na gestão de manutenção e na engenharia de produtos, com foco na segurança dos trabalhadores e na saúde ocupacional.

Júnior *et al.* (2020) realizaram uma pesquisa em um processo de fabricação de uma empresa de grande porte do setor metal-mecânico, detalhando a implantação do FMEA. O estudo foi conduzido por meio de uma abordagem bibliográfica e pesquisa-ação, com a participação de uma equipe multidisciplinar. O processo seguiu o ciclo de quatro etapas da pesquisa-ação: planejamento, ação, monitoramento e avaliação. O FMEA foi aplicado ao processo de fabricação de um eixo de turbina de energia elétrica, envolvendo etapas como usinagem, recebimento de matéria-prima, proteção e embalagem. A aplicação da ferramenta revelou modos de falha previamente não identificados, como falhas relacionadas a operadores não qualificados, ferramentas inadequadas e falhas na matéria-prima. Esses modos de falha foram analisados, e ações corretivas foram implementadas para mitigar os riscos identificados. A aplicação do FMEA proporcionou à empresa um melhor entendimento das falhas potenciais e possibilitou a implementação de ações corretivas, resultando em melhorias na eficiência e na redução de custos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O papel da indústria de beneficiamento da soja

O beneficiamento da soja consiste em um conjunto de processos industriais e mecânicos aplicados aos grãos após a colheita, com o objetivo de melhorar sua qualidade, facilitar o armazenamento e viabilizar seu aproveitamento na produção de subprodutos, como óleo vegetal, farelo proteico, lecitina e casca. Segundo Lima e Gomes (2020), o beneficiamento compreende operações que visam preparar os grãos para o armazenamento, industrialização ou comercialização, envolvendo etapas como limpeza, secagem, classificação e acondicionamento.

A indústria de beneficiamento da soja desempenha um papel essencial dentro da cadeia produtiva, ao transformar o grão bruto em produtos de alto valor agregado. Essa indústria não

apenas impulsiona a economia agrícola, mas também fortalece o setor industrial, gerando empregos, renda e promovendo o desenvolvimento regional. De acordo com a Embrapa (2013), a importância da indústria de beneficiamento da soja se reflete em diversos aspectos, com destaque para a agregação de valor ao grão, que o torna mais rentável e competitivo no mercado. Além disso, o setor apresenta elevada competitividade, sendo estratégico para a economia nacional, especialmente pelo seu papel nas exportações (Silva e Bertonecello, 2017).

O setor de processamento de soja no Brasil movimentou bilhões de reais anualmente e é responsável por fornecer insumos essenciais para vários segmentos industriais. Em 2024, a cadeia produtiva da soja movimentou R\$ 650,4 bilhões, o que representou 5,5% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e 23,8% do PIB do agronegócio, conforme relatório do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, 2024) em parceria com a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2024). Ainda em 2024, o Brasil atingiu um recorde no processamento de soja, com 54,5 milhões de toneladas esmagadas ao longo do ano. Para 2025, projeta-se um novo recorde, com o processamento alcançando 57 milhões de toneladas, representando um crescimento de 4,6% (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2024).

No âmbito internacional, o Brasil é um dos maiores exportadores de soja e seus derivados. Em 2024, segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (2024), o país exportou 97,8 milhões de toneladas de soja em grão, 22 milhões de toneladas de farelo e 1,15 milhão de toneladas de óleo de soja. Essas exportações geraram uma receita de US\$ 52,1 bilhões, consolidando o complexo soja como o principal segmento do agronegócio brasileiro em termos de geração de divisas.

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Companhia Nacional de Abastecimento, 2025), a expressiva produção e o robusto parque industrial de beneficiamento mantêm o Brasil entre os maiores produtores e exportadores globais de soja e seus derivados. Esse desempenho reflete a força estrutural do setor no agronegócio nacional, bem como sua capacidade de atender aos mercados internacionais com competitividade, qualidade e volume. O avanço tecnológico nas etapas de processamento também contribuiu para o aumento da eficiência produtiva e para a diversificação dos subprodutos ofertados ao mercado global. Segundo Araújo e Oliveira (2018), o processamento da soja envolve tecnologias específicas que permitem a extração eficiente do óleo e o aproveitamento integral do farelo. O investimento em inovação tecnológica também se mostra crucial, visto que a indústria busca constantemente otimizar a eficiência e a sustentabilidade dos processos de beneficiamento. Tal esforço por

modernização e adoção de novas tecnologias tem repercussões diretas na capacidade do setor de atender ao mercado global com produtos de alta qualidade e maior valor agregado, além de contribuir significativamente para o desempenho do país no comércio internacional.

2.2 *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*

A Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA, do inglês *Failure Modes and Effects Analysis*) é uma metodologia estruturada e sistemática empregada para identificar, analisar e priorizar falhas potenciais em produtos, processos ou sistemas, visando reduzir riscos e melhorar a confiabilidade e a qualidade (Stamatis, 2003; Filho, 2010; Sharma e Srivastava, 2017). Essa técnica promove uma análise detalhada dos modos de falha potenciais, suas causas e efeitos, orientando a implementação de ações preventivas ou corretivas que evitem a ocorrência de falhas no produto final (Sankar e Prabhu, 2001; McDermott *et al.*, 2009; Cheraghi *et al.*, 2019). Dessa forma, o objetivo central do FMEA é mitigar riscos por meio da detecção antecipada de falhas e de suas causas e efeitos, permitindo a aplicação de ações voltadas à melhoria contínua da confiabilidade e da qualidade (Mota & Cavaignac, 2019).

Embora a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) seja tradicionalmente utilizada de forma preventiva para identificar e mitigar falhas antes que ocorram diversos especialistas destacam em seus estudos como Stamatis (2003), Filho (2010), Miguel e Ferreira (2012) e Sharma e Srivastava, (2017) a importância de empregar essa ferramenta também na análise de falhas já ocorridas.

Segundo Miguel e Ferreira (2012) a FMEA também pode ser utilizada para produtos regulares, processos novos ou implantados. Garcia (2000) destaca que, quando usado com eficiência, a FMEA se transforma em um registro histórico para futuros estudos, fortalecendo a melhoria contínua. Palady (2004) ressalta que a FMEA atua como um repositório de conhecimento sobre o produto e o processo, garantindo que erros passados não se repitam. Além disso, Sankar e Prabhu (2001) afirmam que a atualização do FMEA a partir de falhas reais é essencial para programas de melhoria contínua, enquanto McDermott *et al.* (2009) enfatizam o uso de dados reais e históricos para refinar as análises e a gestão de riscos. Assim, ainda que concebido como ferramenta preventiva, o FMEA, ao incorporar falhas reais, fortalece o aumento organizacional e contribui de maneira eficaz para a prevenção de problemas futuros e para o aprimoramento contínuo de processos e produtos.

Existem diferentes classificações para os tipos de FMEA utilizadas na literatura. Alguns autores distinguem quatro categorias: FMEA de Sistema, Produto, Processo e Serviço. Outros consideram apenas três: FMEA de Produto, Processo e Serviço. Contudo, os tipos mais

conhecidos e amplamente aplicados são dois: FMEA de Projeto e FMEA de Processo (Cruz, 2009; Toledo *et al.*, 2012; Souza, 2017). Conforme Toledo *et al.* (2012) O FMEA de Produto analisa as falhas potenciais no produto dentro das especificações de projeto, com o objetivo de evitar falhas decorrentes do projeto e o FMEA de Processo consideram as falhas relacionadas ao planejamento e à execução do processo, buscando prevenir problemas na fabricação e montagem que possam causar não conformidades em relação às especificações do produto, tendo como objetivo evitar falhas no processo. Essa distinção evidencia os diferentes focos e aplicações da metodologia, conforme as necessidades específicas de cada etapa.

Historicamente, a FMEA foi desenvolvida no final da década de 1940 pelas Forças Armadas dos Estados Unidos, em resposta à crescente complexidade dos sistemas militares e à necessidade de garantir altos níveis de confiabilidade operacional (Sharma e Srivastava, 2017). Posteriormente, na década de 1960, a metodologia foi incorporada pela indústria aeroespacial, setor notoriamente exigente em termos de segurança e desempenho. Já na década de 1970, a Ford Motor Company introduziu a FMEA no setor automotivo, demonstrando sua eficácia na elevação dos padrões de segurança e na conformidade com requisitos regulatórios.

A partir desse período, a FMEA passou a ser amplamente adotada por diversos segmentos industriais como componente fundamental dos sistemas de gestão da qualidade. A atuação de organizações como o *Automotive Industry Action Group* desempenhou um papel crucial na padronização e na difusão da metodologia, consolidando-a como uma ferramenta indispensável para a análise de riscos, a prevenção de falhas e o aumento da melhoria contínua nos processos industriais (Price, 2014; Sharma e Srivastava, 2017).

3.2.1 Aplicação do FMEA

A FMEA de acordo Carpinetti (2016) é composto por três fases de aplicação, sendo a primeira a identificação detalhada de falhas potenciais ou ocorridas, suas causas e os mecanismos de detecção existentes, que são essenciais para a análise de risco, em seguida são atribuídos valores quantitativos ou qualitativos para severidade, ocorrência e detecção, que representam o impacto, a frequência e a capacidade de identificar as falhas, respectivamente (Kang *et al.* 2017).

A severidade (S) abrange o grau de gravidade do efeito da falha, seja para o cliente ou para o próprio processo de produção ou prestação de serviços. Avaliada geralmente em uma escala de 1 a 10, onde 1 indica impacto mínimo e 10 o mais elevado, a severidade permite à equipe identificar as consequências potenciais das falhas, priorizando as mais críticas (McDermott *et al.*, 2009; Sukania, 2014; Gonçalves, 2015). Segundo Sharma e Srivastava

(2017), esse parâmetro é essencial para direcionar ações corretivas e preventivas, garantindo que as falhas mais graves sejam tratadas com urgência.

A ocorrência (O) é responsável por analisar a probabilidade de uma falha ocorrer a partir das causas identificadas no processo ou no projeto. Esse parâmetro não considera apenas a existência das causas, mas também a frequência com que elas podem se manifestar na prática, fornecendo um indicativo claro do risco associado à falha (McDermott *et al.*, 2009; Gonçalves, 2015; Sukania, 2014). A ocorrência é normalmente avaliada em uma escala de 1 a 10, sendo 1 o índice mínimo indicando que a causa é extremamente improvável e 10 o índice máximo representando que a falha pode ocorrer com grande frequência.

A detecção da falha (D) avalia a eficácia dos controles atuais do processo em identificar uma falha antes que ela ocorra. Esse parâmetro mede a capacidade de detectar o modo de falha e prevenir que ele chegue ao cliente ou cause impactos significativos no processo (McDermott *et al.*, 2009; Sukania, 2014; Gonçalves, 2015). A detecção é quantificada em uma escala de 1 a 10, onde 1 representa o nível mais elevado de detecção indicando que a falha tem pouquíssima chance de passar despercebida e 10 reflete a menor capacidade de detecção possível, significando que os controles são praticamente inexistentes ou ineficazes (Sharma & Srivastava, 2017). Após a definição dos parâmetros de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D), é necessário realizar o cálculo do Número de Prioridade de Risco (RPN, do inglês *Risk Priority Number*). Esse índice é obtido, segundo Ballesteros Alvarez (2012) e Wang *et al.* (2018), como o produto dos três parâmetros fundamentais, conforme demonstrado na Equação 1:

$$\text{RPN} = (\text{S}) \times (\text{O}) \times (\text{D}) \quad (1)$$

De acordo com McDermott *et al.* (2009), o RPN representa uma métrica que quantifica o risco associado a cada modo de falha identificado, fornecendo uma base objetiva para priorizar ações corretivas ou de melhoria. Quanto maior o valor do RPN, maior a prioridade a ser atribuída à implementação de ações para eliminação ou mitigação da falha (Gonçalves, 2015). Dessa forma, o RPN desempenha um papel essencial na aplicação do FMEA, ao viabilizar a gestão de riscos de maneira sistemática e estruturada (Sharma & Srivastava, 2017).

Além disso, a utilização do RPN como critério de priorização promove a objetividade na tomada de decisões, permitindo que equipes de trabalho e gestores avaliem as falhas com base em dados concretos e em análises sistemáticas (Shahzad & Safvi, 2010). Dessa forma, o RPN contribui para a eficácia dos programas de melhoria contínua, ao viabilizar a identificação das

falhas mais relevantes e o planejamento de ações corretivas que aumentem a confiabilidade e a segurança dos processos e produtos (Filho, 2010).

A segunda fase é dedicada ao estabelecimento de planos de ação que busquem eliminar ou reduzir as falhas identificadas, levando em conta a ordem de prioridade estabelecida com base no RPN. Essa etapa é essencial para garantir que as falhas mais críticas recebam atenção imediata e que os esforços de mitigação sejam direcionados de forma eficiente (Henni *et al.*, 2024). Já a terceira fase envolve a verificação dos resultados alcançados, realizando uma reanálise dos modos de falha, ocorrência e detecção para verificar se as ações corretivas e preventivas implementadas foram eficazes em reduzir o risco e melhorar a confiabilidade do processo ou produto.

3 METODOLOGIA

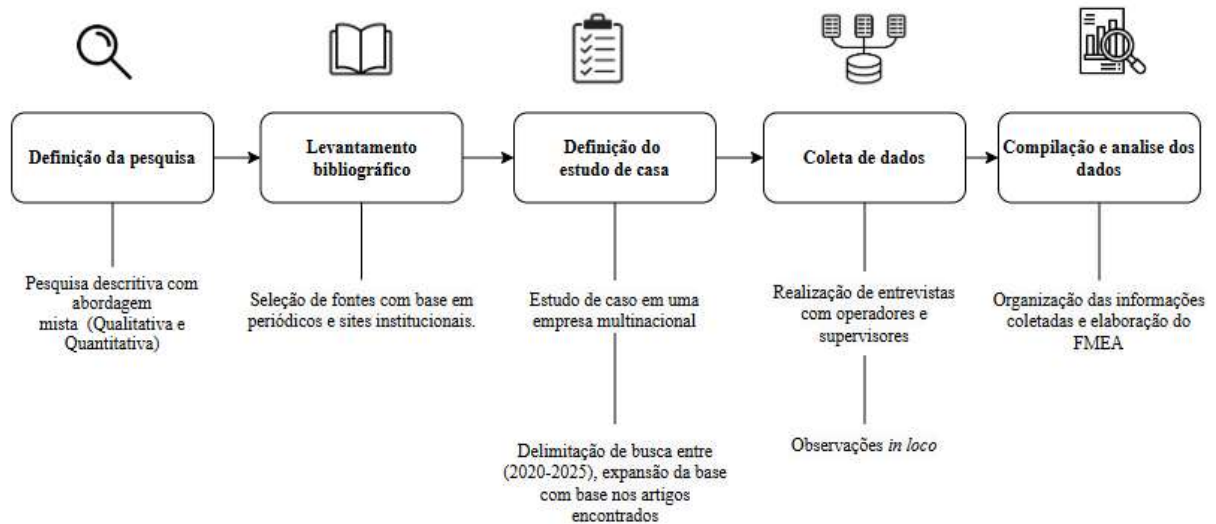
Este estudo tem como objetivo realizar uma pesquisa descritiva, que, segundo Montgomery (2024), visa descrever as características de um fenômeno, aprofundando-se nas causas e nas relações entre variáveis de uma população ou sistema. Essa abordagem permite analisar o processo, identificar falhas, interpretar dados e oferecer uma visão abrangente do sistema, facilitando a compreensão de como suas partes interagem e como as falhas impactam o conjunto.

O trabalho foi definido como estudo de caso, com foco na análise detalhada de um processo específico dentro de uma empresa multinacional localizada na região do Oeste da Bahia. A escolha por esse tipo de abordagem se deve ao fato do estudo de caso proporcionar uma compreensão profunda e contextual dos fenômenos, permitindo explorar processos de forma mais detalhada (Gibson e Groom, 2024).

Com base nesse objetivo, adotou-se uma abordagem metodológica mista, combinando métodos quantitativos e qualitativos. Conforme Dasic e Vukovic (2024), essa integração permite uma compreensão mais completa e abrangente do processo de estudo, pois combina a riqueza dos dados qualitativos com a objetividade dos dados quantitativos, proporcionando uma visão mais completa ao explorar padrões gerais e experiências individuais (Emom, 2024). A escolha dessa abordagem se justifica por sua flexibilidade e adaptabilidade (Turner *et al.*, 2024), características que permitem a coleta de dados detalhados e contextualizados. Essa estratégia proporcionou à pesquisadora uma compreensão mais aprofundada do fenômeno, favorecendo uma análise mais subjetiva e interpretativa do objeto de estudo. A seguir, apresenta-se o fluxograma da metodologia (Figura 1), o qual ilustra o percurso metodológico adotado na pesquisa, desde a definição do tipo de estudo até a análise dos dados. Esse diagrama tem como

objetivo facilitar a compreensão das etapas desenvolvidas e demonstrar a integração entre os diferentes métodos utilizados.

Figura 1: Fluxograma metodológico



Fonte: Autora (2025).

Para fundamentar a investigação, foi realizado um levantamento bibliográfico a partir de artigos científicos indexados em bases de dados especializadas por meio de periódicos e outras fontes relevantes como sites institucionais, que forneceram informações relevantes e atualizadas sobre o tema de estudo. Os periódicos foram selecionados com base em sua credibilidade e relevância para a pesquisa, além de delimitados entre 2020 a 2025, durante a análise desses artigos, foram encontradas novas referências mencionadas pelos autores, as quais se revelaram pertinentes para o aprofundamento da pesquisa. Assim, a base de dados original foi expandida.

A pesquisa foi conduzida por meio da coleta de dados obtidos através de diálogos com operadores e supervisores diretamente envolvidos no processo, que acumulam experiência profissional variando entre cinco e quinze anos na empresa. Esses profissionais acompanharam integralmente desde a instalação do equipamento, passando por treinamentos e análise de riscos, oferecendo uma contribuição sólida e fundamentada acerca do funcionamento e dos potenciais falhas do sistema.

Para o cálculo do RPN (Risk Priority Number) do FMEA, foi essencial garantir que todos os participantes compreendessem claramente o significado e a representatividade de cada pontuação. Assim, todos os entrevistados foram devidamente orientados quanto a esses critérios. No momento da definição dos valores atribuídos a cada item, a pontuação foi

estabelecida com base nos Quadros 1, 2 e 3, que detalham os critérios utilizados para avaliação de cada um dos três parâmetros mencionados.

Quadro 1: Critério de análise e sistema de ranqueamento para a ocorrência da falha

Probabilidade de falha	Possíveis taxas de falhas	Rank
Extremamente alta: quase inevitáveis	≥ 1 em 2	10
Muito alta	1 em 3	9
Repetidas falhas	1 em 8	8
Alta	1 em 20	7
Moderadamente alta	1 em 80	6
Moderada	1 em 400	5
Relativamente baixa	1 em 2000	4
Baixa	1 em 15000	3
Remota	1 em 150000	2
Quase impossível	1 em 1500000	1

Fonte: Leal (2006).

Quadro 2: Critério de análise e sistema de ranqueamento para a detecção da causa da falha

Deteção	Probabilidade de deteção da causa da falha	Rank
Absolutamente incerta	A manutenção não detecta a causa da falha potencial, ou não existe manutenção	10
Muito remota	Chance muito remota de se detectar a causa da falha	9
Remota	Chance remota de se detectar a causa da falha	8
Muito baixa	Chance muito baixa de se detectar a causa da falha	7
Baixa	Chance baixa de se detectar a causa da falha	6
Moderada	Moderada chance de se detectar a causa da falha	5
Moderadamente alta	Moderadamente alta a chance de se detectar a causa da falha	4
Alta	Chance alta de se detectar a causa da falha	3
Muito alta	Chance muito alta de se detectar a causa da falha	2
Quase certa	A manutenção quase certamente detectará a causa da falha.	1

Fonte: Leal (2006).

Quadro 3: Critério de análise e sistema de ranqueamento para a severidade (gravidade) dos efeitos da falha

Efeito	Severidade do efeito	Rank
Perigoso	Falha é perigosa, e ocorre sem aviso. Capaz de suspender a operação dos sistemas e/ou envolve aspectos não complacentes com regulações governamentais	10
Sério	Os efeitos podem ser perigosos e/ou envolvem aspectos não complacentes com regulações governamentais	9
Importante	Produto inoperável, com perda da função básica. Sistema inoperante	8
Impactante	Desempenho do produto sofre impacto. Sistema pode não operar	7
Significativo	Desempenho do produto é degradado. Funções atreladas ao conforto podem não operar.	6
Moderado	Moderado efeito no desempenho do produto. Produto requer reparos.	5
Baixo	Pequeno efeito no desempenho do produto. O produto não requer reparos.	4
Desprezível	Efeito desprezível no desempenho do produto ou sistema.	3
Muito desprezível	Efeito muito desprezível no desempenho do produto ou sistema	2
Nenhum	Nenhum efeito	1

Fonte: Leal (2006).

Após a etapa de entrevistas, foram realizadas observações *in loco* semanalmente por meio de inspeções e registros com o objetivo de obter uma visão mais detalhada e precisa do processo em estudo (Corsby e Townsend, 2024). Durante essas observações, a pesquisadora acompanhou as atividades dos operadores e supervisores durante um período de um ano, registrando informações relevantes sobre o funcionamento do equipamento e a dinâmica operacional. Posteriormente, os dados coletados foram compilados e organizados para a elaboração da Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA). É importante ressaltar que toda a pesquisa foi conduzida em conformidade com os princípios éticos, garantindo a confidencialidade das informações e o consentimento livre e esclarecido de todos os participantes envolvidos.

3.1 Apresentação da empresa

O estudo de caso foi realizado na unidade localizada na região oeste da Bahia. Essa região destaca-se por sua localização estratégica, impulsionada pelo crescimento expressivo da agricultura irrigada. Desde a década de 1990, as áreas irrigadas na Bahia Ocidental expandiram-se 150 vezes, resultando em um aumento de 3,17 milhões de hectares na área agrícola entre 1990 e 2020 (Santos, 2022).

Atualmente, segundo a Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia (Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia, 2024), a safra de 2024/2025 prevê um crescimento de 7,5% na área plantada, alcançando 2,129 milhões de hectares, com expectativa de produção de 8,558 milhões de toneladas de soja. Esses números evidenciam a relevância econômica e estratégica do oeste baiano para o agronegócio nacional e global. Além disso, a região se beneficia da proximidade com importantes áreas agrícolas, especialmente o MATOPIBA (compreende os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) consolidando-se, segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2024), como uma das fronteiras agrícolas mais produtivas do Brasil. Essa localização estratégica não apenas facilita a exportação de produtos processados, mas também fortalece a cadeia logística, promovendo o escoamento eficiente da produção para os mercados interno e externo (Companhia Nacional de Abastecimento, 2024).

A unidade analisada é responsável pela produção de óleo refinado, envase de óleo, casca peletizada, farelo de soja e lecitina envasada. Além de sua importância na cadeia produtiva, a unidade desempenha um papel essencial no desenvolvimento econômico da região, gerando empregos diretos e indiretos e impulsionando o crescimento da economia local. Sua atuação vai além da simples produção, contribuindo significativamente para o fortalecimento do setor agroindustrial não apenas no oeste da Bahia, mas também em todo o país. A unidade consolida-se como um elo fundamental na cadeia de grãos e óleos vegetais, promovendo, ainda, a integração com a economia global (Silva, 2022).

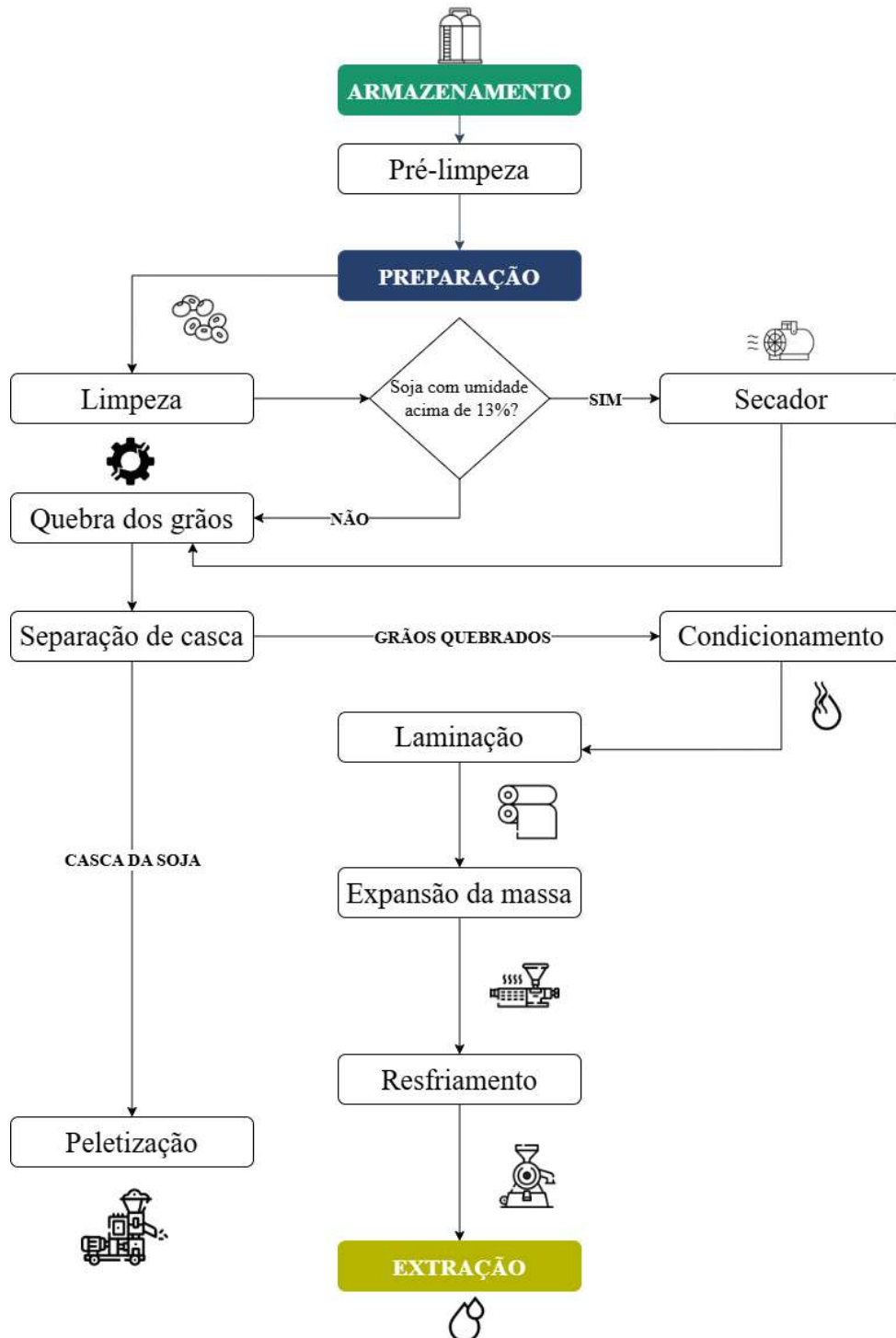
No entanto, apesar dos benefícios esperados, a Expander instalada na unidade de estudo apresenta diversos desafios operacionais, muitos deles relacionados a falhas decorrentes de erros de projeto. Essas falhas provocam paradas inesperadas e recorrentes, comprometendo a continuidade da produção, a capacidade de processamento e os ganhos de eficiência inicialmente esperados. Mesmo com a implementação de melhorias ao longo do tempo, o equipamento ainda não atende integralmente à demanda produtiva da planta, gerando obstruções frequentes e aumento nos custos operacionais.

4.2 Descrição do processo

O processo de obtenção do óleo de soja bruto envolve uma série de etapas fundamentais, que visam garantir a qualidade do produto final e otimizar o aproveitamento da matéria-prima. Entre essas etapas, destacam-se o armazenamento, a preparação e a extração dos grãos, conforme descrito por Mandarinó *et al.* (2015). Cada uma dessas fases desempenha um papel essencial na eficiência operacional e na qualidade do óleo obtido, assegurando que o processo seja conduzido de forma segura, econômica e sustentável.

O fluxograma 2 ilustra as principais etapas do processo de produção da soja. Este fluxograma tem como objetivo fornecer uma visão clara e objetiva de cada fase envolvida. Cada etapa será explicada detalhadamente, permitindo uma melhor compreensão do funcionamento do processo e das interações entre as diferentes fases.

Figura 2: Etapas do Processo de Produção da Soja



Fonte: Autora (2025).

4.2.1 O processo de armazenamento dos grãos

Ao chegar das fazendas ou unidades armazenadoras, a soja passa por um criterioso processo de pré-limpeza e limpeza, essencial para a remoção de impurezas como caules, folhas, vagens, grãos quebrados, poeira, pedras e sementes indesejadas (Fontes, 2019). Essa etapa inicial é fundamental não apenas para assegurar a qualidade do grão, mas também para preservar o bom funcionamento dos equipamentos utilizados no processamento industrial (Heming, 2016). Ainda Segundo Heming (2016), a limpeza adequada dos grãos previne obstruções, vazamentos, redução da capacidade operacional dos equipamentos e seu desgaste prematuro. A presença de impurezas compromete a conservação dos grãos, eleva os riscos de deterioração e pode impactar diretamente as etapas subsequentes da produção. Para garantir a eficiência dessa etapa, utiliza-se uma combinação de equipamentos especializados, como peneiras, aspiradores e separadores magnéticos. Esses dispositivos asseguram que apenas os grãos íntegros avancem para o beneficiamento, após a pré-limpeza (Mandarino *et al.*, 2015; Oliveira, 2020).

Concluída a limpeza, caso os grãos apresentem alto teor de umidade, eles são direcionados para os secadores antes do armazenamento. Essa etapa de secagem é essencial para ajustar a umidade a níveis ideais, segundo a Embrapa (2023) abaixo de 13% garantindo a segurança e a qualidade dos grãos durante o armazenamento. Como destacam Mandarino *et al.* (2015), grãos armazenados com umidade superior a 13% apresentam aumento da acidez, o que causa escurecimento do óleo e alterações sensoriais que afetam sabor e aroma de óleos e farelos. Para evitar esses problemas, O controle rigoroso das condições de armazenamento, aliado a práticas adequadas de manejo, pode mitigar esses efeitos negativos, promovendo a conservação da qualidade e o aumento da longevidade das sementes (Vaghasiya *et al.*, 2023).

4.2.2 O processo de preparação dos grãos

A preparação da semente de soja é um processo crucial que envolve uma série de procedimentos específicos. O objetivo principal é transformar a semente em flocos de soja, garantindo assim que a extração subsequente seja realizada de forma eficiente, rápida e econômica (Fontes, 2019), ou seja a soja é basicamente preparada da melhor forma possível para ter seu óleo extraído, Antes de seguir para as subetapas a soja passa por mais uma limpeza para garantir que não haja impurezas residuais que possam comprometer a qualidade do produto final ou interferir nas etapas subsequentes de processamento, buscando remover partículas finas como poeira, pequenas pedras, fragmentos de vagens e outros materiais estranhos que possam ter sido negligenciados na pré-limpeza (Silva, 2018; Souza *et al.*, 2019).

Após a limpeza, realiza-se a verificação do teor de umidade dos grãos. Caso a soja apresente um índice superior ao ideal para o processamento, que geralmente varia entre 12% e 13%, ela é direcionada para o secador, onde é submetida a um controle de temperatura e fluxo de ar quente (Antunes *et al.*, 2024).

4.2.3 Quebra dos grãos

O grão de soja é quebrado por um equipamento denominado "moinho quebrador". De acordo com o Bühler Group (2015), o moinho quebrador é projetado para quebrar sementes oleaginosas utilizando dois cilindros raiados que giram em sentidos opostos e com velocidades diferentes. Segundo Freitas *et al.* (2017) Várias configurações de cortes podem ser encontradas, porém a mais usual é a corte/corte, onde o rolo lento "segura" o material e o rolo rápido "corta" o material contra o rolo lento. As Figura 3 e 4 ilustram o moinho quebrador, equipamento comumente utilizado em grandes indústrias no processo de produção de óleo de soja.

Figura 3 - Estrutura interna do Moinho de quebra



Fonte: Bühler Group (2015)

Figura 4 – Estrutura externa do Moinho de quebra



Fonte: Buhler Group (2015).

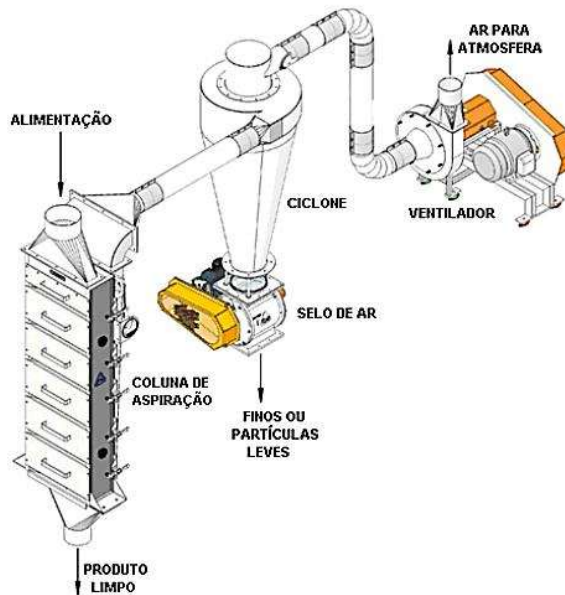
A ruptura ideal por grão varia entre 8 e 16 pedaços, garantindo a máxima exposição das células de óleo e otimizando os processos de laminação e extração (Kohli e Singha, 2024). Portanto, a configuração do quebrador deve ser ajustada para alcançar o tamanho de partícula adequada (Politiek *et al.*, 2022). Além disso, o controle da umidade da soja é importante nesta etapa, uma vez que altos níveis de umidade dificultam o processo de craqueamento, resultando em pedaços maiores e eficiência reduzida, enquanto a soja muito seca leva a partículas mais finas, impactando negativamente a qualidade do farelo e o rendimento do óleo (Demarco e Gibon, 2019; Kohli e Singha, 2024).

4.2.4 Separação de casca

Após a quebra do grão, a remoção da casca é fundamental para reduzir o teor de fibra, permitindo a produção de farelo com maior concentração de proteína (Shijun *et al.*, 2017). Nesse processo, os grãos quebrados são encaminhados para peneiras que classificam as partículas conforme seu tamanho e formato, gerando três fluxos distintos: finos, médios e grossos (Nazarenko e Oryshchenko, 2023). A granulometria adequada do material é crucial para garantir uma separação eficiente das cascas, otimizando o processamento e melhorando a qualidade do produto final.

A Figura 5 ilustra o funcionamento de um sistema de aspiração de casca, destacando os componentes principais e o fluxo do material durante o processo.

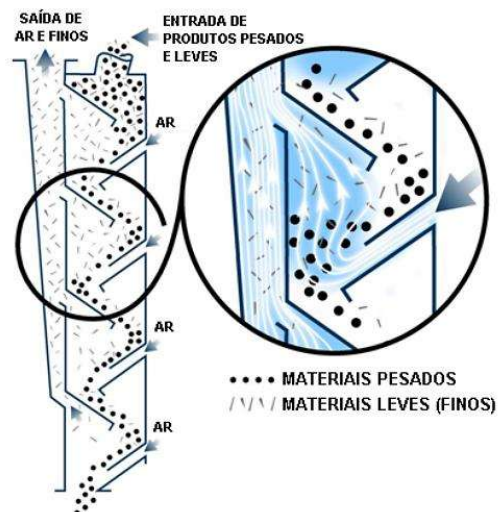
Figura 5 - Sistema de aspiração de casca



Fonte: Kice (2015).

Segundo Kice Industries (2015), na coluna de separação, o produto é segregado por tamanho e densidade, aproveitando as diferenças nas velocidades terminais das partículas. O ar aspirado eleva as partículas leves para uma câmara de seleção, onde a remoção da casca ocorre pelo arraste do material causado pela velocidade do ar. Nesse processo, as partículas leves são separadas das mais pesadas, podendo ser direcionadas para fora do sistema ou retornar à corrente de ar, conforme exemplificado na Figura 6:

Figura 6 - Funcionamento da coluna de separação



Fonte: Kice (2015).

Em seguida, as partículas mais densas seguem para as fases subsequentes, podendo passar por uma nova rodada de seleção. Após essa primeira etapa de separação, os diferentes fluxos de partículas seguem para colunas de aspiração, onde as cascas restantes são removidas e recuperadas em ciclones, conforme descrito por Muschelknautz e Greif (1996). Os grãos, agora mais limpos, seguem para a próxima fase do processo de beneficiamento.

Além de melhorar a qualidade do farelo, esse processo contribui para um aumento de 3 a 5% na eficiência da extração de óleo (Yaoli *et al.*, 2014). A separação das cascas também desempenha um papel crucial na preservação dos equipamentos industriais, pois, sendo altamente abrasivas, elas aceleram o desgaste do maquinário de processamento. Ao removê-las, prolonga-se a vida útil dos equipamentos, reduzindo os custos de manutenção e elevando a eficiência operacional (Dudarev *et al.*, 2024).

4.2.5 A etapa do condicionamento

O condicionamento é o processo no qual as paredes celulares dos grãos são rompidas para facilitar a liberação do óleo. Esse procedimento tem como objetivo tornar os pedaços de grãos mais maleáveis e macios para a laminação, o que, além de melhorar a eficiência da extração, reduz o desgaste dos laminadores, otimizando o desempenho do processo de moagem (Bănuță e Tița, 2023). O equipamento utilizado nesse processo, denominado como condicionador, possui formato cilíndrico horizontal, fabricado em chapas de aço carbono com espelhos nas extremidades (TNL Tecnal, 2025). De acordo com a Bühler Group (2015), o condicionador é levemente inclinado e projetado para operar por rotação, podendo ser encontrado nas versões vertical ou horizontal. A Figura 5 ilustra o modelo horizontal, que apresenta um corpo cilíndrico rotativo apoiado sobre soquetes, contendo um feixe de tubos internos alimentados por vapor, responsável pelo aquecimento indireto dos grãos quebrados.

Figura 7 - Condicionador rotativo



Fonte: TECNAL (2025).

O movimento rotacional, aliado à inclinação, permite o deslocamento da soja de uma extremidade à outra, promovendo uma distribuição uniforme de calor e umidade. Esse sistema utiliza tanto vapor indireto, que circula nos tubos internos (Qian *et al.*, 2013), quanto vapor direto, que pode ser empregado para ajustar a umidade dos grãos (Guarienti, 2009). Assim, a principal função do condicionador é “cozinhar” a soja, elevando simultaneamente sua temperatura e teor de umidade, preparando-a adequadamente para as etapas subsequentes do processo de extração.

4.2.6 O processo de Laminação

A laminação da soja facilita o rompimento das células oleaginosas, promovendo a liberação do óleo durante o processo de extração por solvente (Santos *et al.*, 2017). A principal função desses equipamentos é achatar os grãos de soja de maneira eficiente, reduzindo sua espessura e aumentando a área superficial (Rani *et al.*, 2021). A formação de flocos com espessura adequada aumenta a área de contato, o que permite uma penetração mais eficiente do solvente e melhora o rendimento da extração.

O controle dessa fase é crucial, pois flocos excessivamente finos podem causar obstruções no percolador. De acordo com Vadke (2024), flocos finos podem gerar compactação excessiva, dificultando a percolação do solvente e aumentando o consumo de energia na operação." Por outro lado, flocos muito grossos podem prejudicar a difusão do solvente, o que diminui a eficiência do processo (Bănuță & Tița, 2023). Os laminadores geralmente são compostos por um par de rolos de grande diâmetro, cujas superfícies podem ser lisas ou levemente texturizadas, dependendo das especificações do processo. A Figura 8, ilustra o modelo típico de laminador utilizado em indústrias de processamento de soja.

Figura 8 - Laminador



Fonte: TECNAL (2025).

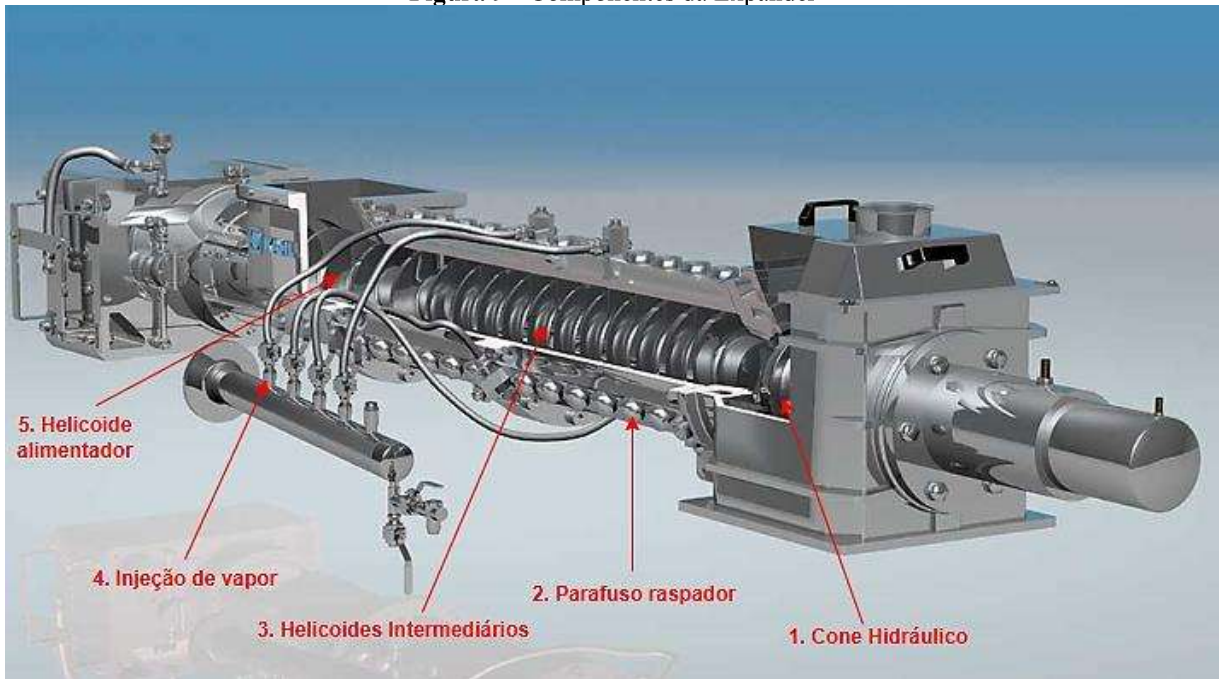
Os laminadores são projetados para garantir um fluxo uniforme de soja durante o processo de laminação, exercendo uma pressão controlada sobre os grãos, que são alimentados entre rolos ajustáveis, esses rolos são ajustados para exercer uma pressão controlada sobre os grãos, que são alimentados entre eles. As lâminas resultantes dessa pressão, geradas pela ação de rolos que giram em velocidades diferentes, possuem normalmente espessura entre 0,3 e 0,4 mm (Alloco, 2020). Esse processo facilita a liberação do óleo na etapa subsequente de extração, seja por solvente ou prensagem, otimizando o rendimento da extração (Rani *et al.*, 2021).

4.2.7 Expansão da massa

A expansão da massa é uma etapa não opcional no beneficiamento da soja, introduzida em 1978, quando a TNL Tecnal lançou no mercado mundial uma nova tecnologia denominada *Expander*. O desenvolvimento dessa inovação foi resultado de uma parceria entre o fundador da empresa, e o sócio, com uma processadora de óleo brasileira. Inicialmente, a tecnologia foi adotada exclusivamente por fábricas no Brasil, mas, com o tempo, ganhou reconhecimento internacional, consolidando-se como uma solução eficiente para otimizar o processo de extração de óleo vegetal (TNL TECNAL, 2025). A adoção da *Expander* oferece diversas vantagens, como maior rendimento de óleo, com até 13 litros por 100 quilos de soja, devido ao aumento da área de superfície, facilitando a penetração do solvente durante a extração (Aremu *et al.*, 2019), e, conseqüentemente, a redução dos custos operacionais, pois diminui o uso excessivo de solventes (Douglas e Tooley, 2022).

Outros benefícios incluem a redução do teor de óleo residual no farelo e a economia de energia e vapor. Além disso, a implementação desse equipamento não requer aumento de mão de obra, o que torna o processo mais eficiente e econômico (Silva e Anjos, 2020). A operação dos expansores baseia-se na adição de umidade à alimentação por meio de unidades de preparação de vapor, submetendo a soja a altas temperaturas e pressões, o que causa a expansão térmica (Hongfei e Donghui, 2019). Esse mecanismo facilita a manipulação das matérias-primas, garantindo maior uniformidade e estabilidade no processo produtivo. Como destacado por Blagov *et al.* (2020), essa tecnologia reduz significativamente o tempo de processamento, tornando a produção mais eficiente e padronizada, facilitando a extração do óleo. A expansora é um equipamento horizontal e cilíndrico, com um eixo helicoidal em seu interior, que transporta o material até a saída (Tsuboi *et al.*, 2020). A figura nove ilustra os principais componentes da expansora, destacando sua estrutura e funcionamento essenciais para o processo de expansão.

Figura 9 - Componentes da Expander



Fonte: Adaptada da Tecnologia em Movimentação (S/D).

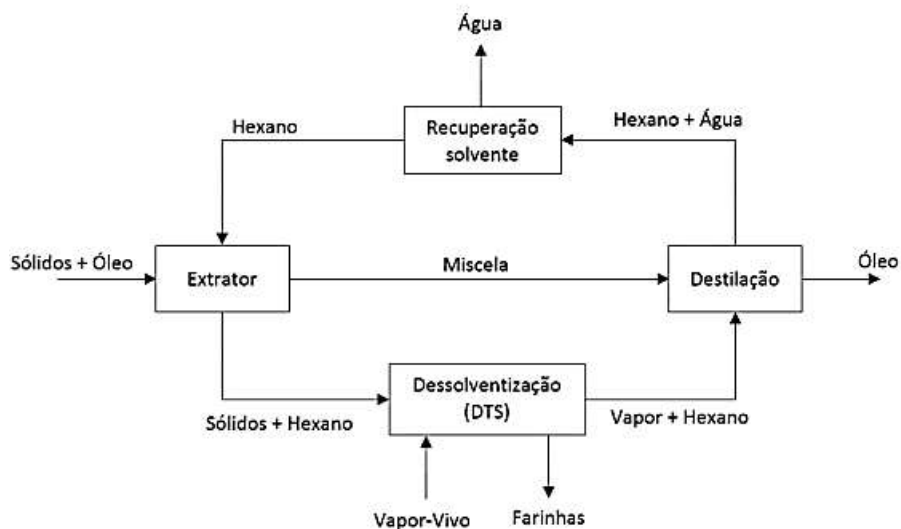
O processo ocorre quando o material é progressivamente pressionado pelos helicoides montados no eixo, que gira de forma descontínua dentro do corpo do equipamento. O material é bem misturado devido aos parafusos raspadores, com canais de injeção de vapor. Na parte de descarga, um cone hidráulico ou um bico dificulta a saída do material, criando pressão interna. A pressão atinge seu pico nesse momento. À medida que o material passa pelos bicos de saída ou pelo sistema Autocone hidráulico, ocorre uma mudança rápida de pressão, promovendo a expansão do material (Hongfei e Donghui, 2019). Esse processo provoca a eliminação da umidade, devido à temperatura elevada, e as moléculas de óleo são transportadas para a superfície do material, tornando-o mais poroso e homogêneo, gerando assim a massa expandida (SILVA *et al.*, 2021; TECNAL, 2025). Em seguida, a massa expandida é resfriada para reduzir a temperatura do material após a exposição a altas pressões e temperaturas, esse processo é realizado de maneira controlada, com o auxílio de sistemas de resfriamento a ar ou água (Santos, 2018), buscando retirar a umidade pela adição do vapor direto. O resfriamento adequado previne a degradação térmica do produto, preserva suas propriedades físico-químicas e facilita o manuseio durante as etapas subsequentes (Costa, 2019).

4.2.8 Extração do óleo

Nesta seção será apresentado de forma resumida o processo de extração do óleo de soja, visto que o maior objetivo é a análise da expansora presente na etapa de preparação. A extração do óleo de soja envolve várias etapas, sendo que a massa expandida e resfriada, após passar

pela expander, segue para o extrator. Este equipamento é responsável pela extração do óleo do material oleaginoso, e o processo é acompanhado de um tratamento preliminar durante a etapa de preparação, essencial para garantir a eficiência da extração. O processo de extração é realizado em um sistema de contracorrente. Enquanto o material é transportado no extrator, a miscela, que é a junção de óleo e solvente, flui através do leito de material para extrair o óleo (Roque, 2015) A cada banho de miscela, a concentração de óleo no material diminui. Após quatro a oito lavagens, o material é lavado com solvente limpo, finalizando o processo de extração. O óleo bruto resultante é então direcionado para tratamentos químicos, enquanto a massa residual passa por um processo de dessolventização e secagem, visando a obtenção do farelo (Guan, 2018) vale ressaltar que na etapa da extração também ocorre subetapas de condensação, destilaria para recuperação de gases, degomagem que não serão abordadas nesse estudo. Na figura10, apresenta-se um diagrama resumido dos principais processos que compõem a etapa de extração de óleo, bem como das transformações físicas e químicas que ocorrem ao longo do sistema.

Figura 10 – Esquema do processo de extração do óleo



Fonte: Laval (2023).

Na figura apresentada, é observado um fluxograma simplificado que ilustra as principais etapas do processo de extração do óleo de soja. Essa representação esquemática permite visualizar de forma clara como se dá a interação entre os processos na etapa da extração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio da aplicação do FMEA no equipamento industrial denominado expander, utilizado na etapa de preparação do processo de extração de óleo de soja. O foco da análise esteve na identificação, avaliação e priorização dos modos de falhas que

possam comprometer a eficiência, a segurança operacional e a disponibilidade do equipamento. Segundo Mobley (2011), essas práticas são fundamentais para garantir o desempenho e a confiabilidade dos sistemas produtivos. A partir da coleta de dados e da análise de registros históricos de falhas e paradas não programadas, foram mapeadas as principais etapas críticas de funcionamento do expander. Em seguida, foi estruturado o FMEA, conforme apresentado no Quadro 4, abrangendo os modos de falha identificados, seus respectivos efeitos, causas potenciais, controles atuais, além dos índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D). A sistematização dessas informações possibilitou a avaliação quantitativa do risco associado a cada falha, por meio do cálculo do Número de Prioridade de Risco (RPN – Risk Priority Number). Esse índice serviu como base para a definição de ações corretivas e preventivas mais eficazes, além de possibilitar a identificação dos modos de falha críticos. De acordo com Cheng *et al.* (2023), essa abordagem quantitativa permite que as organizações concentrem seus esforços na mitigação dos riscos mais significativos, otimizando recursos e priorizando as intervenções de maior impacto.

Quadro 4 – FMEA do estudo

ANÁLISE DO MODELO DE EFEITO DAS FALHAS (FMEA)								
Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa da falha	Controles atuais	Ação realizada	Severidade	Ocorrência	Deteção	Risco (RPN)
Parada da expander	Obstrução do <i>Redler</i>	Passagem de toda a produção pela expander	Velocidade da esteira do resfriador, apresentada no supervísório	Usar gavetas no transportador com correia que controla a passagem total de lâmina.	8	3	2	48
	Obstrução da Rosca transportadora	Velocidade da Rosca transportadora abaixo de X no sistema de controle	Velocidade da Rosca transportadora, apresentada no supervísório	Manter pelo supervísório a velocidade da Rosca Transportadora em X no sistema de controle caso comece a ter obstrução na bica de entrada da Rosca da transportadora aumentar o valor	8	2	2	32
		Retração de vapor na largada da planta (muito vapor e pouca carga)	Pela amperagem da expander, no supervísório	Abertura da válvula em campo em 100% e acompanhamento pelo supervísório controlando o mínimo de abertura da válvula para não ocorrer passagem de muito vapor	10	2	2	40
		Soja com umidade	Acompanhamento pelo NIR online	Passagem da soja pelo secador	3	4	1	12
	Obstrução na bica de entrada da expander	Desprendimento de cascão das pás do <i>Redler</i>	Acompanhamento pela amperagem do <i>Redler</i> e Rosca transportadora	Realizar limpeza na parada preventiva mensal das pás do <i>Redler</i> e ajuste na depressão para eliminar umidade da massa pelo ventilador	10	6	3	180

Parada da expander	Obstrução da bica de saída da expander	Não verificar em campo ao largar a planta a bica do resfriador	Acompanhamento do aumento da amperagem	Operador verificar em campo a bica do resfriador e realizar a desobstrução para descida da massa antes da largada da planta	10	3	3	90
		Redução da velocidade do resfriador	alteração de índices máximo e mínimo no sistema de controle	Operador verifica em campo o nível do resfriador	10	3	2	60
	Obstrução do corpo da expander	Presença de material estranho	Manutenção preventiva dos equipamentos	Fechar as válvulas de vapor e alimentação, abrir totalmente o pistão e virar o eixo dos helicoides manualmente no sentido inverso.	10	2	7	140
	Ausência de vapor na expander	Falha na caldeira	Parar a alimentação imediatamente	Parar o <i>Redler</i> e abrir completamente o pistão para remover todo o material remanescente. Fechar a válvula da gaveta deslizante.	4	3	1	12
	Ausência de soja laminada na expander	Falta de alimentação	04 Silos pulmão na unidade e análise do fluxo da balança	Controlar os níveis dos silos pulmão	4	2	1	8
	Falta de pressão na unidade hidráulica e excesso de vapor	Falha elétrica	Manutenção preventiva	Fechar as válvulas de Vapor do corpo e das camisas	4	3	1	12
	Falha no desempenho do equipamento	Falha mecânica	Manutenção preventiva	Para o equipamento, acionar a manutenção após abertura de nota é realizada manutenção imediata	7	3	5	105
	Redução da produção ou parada forçada do equipamento	Falhas externas	Manutenção preventiva	Verificação de qual equipamento ou motivo externo esteja causando a parada, abrir nota e acionar a manutenção	6	8	2	96

Fonte: Autora (2025).

Como resultado, foi possível a obtenção de 13 modos de falha distintos, cada um avaliado pelos critérios anteriormente mencionados, Vale ressaltar que, durante a elaboração da tabela, foram encontradas algumas dificuldades, devido a divergências nas considerações propostas pelos entrevistados de diferentes turnos. Essas divergências foram solucionadas por meio de uma análise detalhada seguida de um debate entre os participantes, resultando em um consenso definido posteriormente pelos supervisores responsáveis. Os resultados demonstram que o RPN máximo identificado foi de 180, associado à falha de “Obstrução na bica de entrada da expander”, causada pelo acúmulo de cascão desprendido das pás dos *Redlers*. Esse valor elevado de risco evidencia a necessidade urgente de implementar controles mais eficazes. Esses controles são fundamentais, já que o desprendimento de cascão pode ocasionar obstruções severas, resultando em paradas não programadas que comprometem a eficiência operacional, causando um aumento significativo nos custos de produção e perdas financeiras, como resalta Gregório (2018). Outro ponto crítico identificado foi a obstrução do corpo da expander (RPN=140), causada por presença de materiais estranhos, resultando em paradas não programadas e procedimentos corretivos mais complexos e demorados.

Essas duas falhas apresentam valores de RPN considerados críticos. De acordo com Stamatis (2003), McDermott *et al.* (2009) e Joklecar (2019) RPN acima de 100 indicam criticidade e a necessidade de priorizar medidas corretivas e preventivas imediatas. Esses autores apontam que o valor crítico do RPN pode variar entre 80 e 150, dependendo do risco tolerável pela organização e das políticas de qualidade adotadas. Esse alinhamento entre diferentes autores reforça que as falhas analisadas exigem atenção imediata e a adoção de medidas de mitigação robustas, de forma a reduzir a ocorrência e a severidade desses modos de falha, além de aprimorar os controles de detecção. Além disso, falhas externas e falhas mecânicas (RPNs de 96 e 105, respectivamente) também se destacaram como pontos de atenção, embora essas falhas apresentem valores de RPN abaixo das falhas mais críticas, ainda estão próximas do limiar de risco considerado crítico, outros modos de falha como a ausência de soja laminada na expander (RPN = 8), soja com umidade inadequada (RPN = 12) e ausência de vapor (RPN = 12) apresentaram valores baixos de RPN. Essa análise evidencia que os controles e procedimentos de monitoramento implementados atualmente estão sendo eficazes na mitigação desses riscos.

A análise do FMEA revelou a importância de priorizar as falhas críticas com base no RPN e de implementar ações de mitigação direcionadas. Falhas como obstrução da bica de entrada e obstrução do corpo da expander são exemplos de situações em que tanto a severidade quanto a ocorrência e a detecção indicam risco alto, reforçando a necessidade de intervenções imediatas

e de controle rigoroso. Falhas externas e falhas mecânicas também se destacaram como pontos de atenção. Essas falhas, mesmo não ultrapassando o limite crítico de RPN (>100), demonstram que fatores externos ao processo e falhas mecânicas internas podem impactar negativamente a produção. Vale ressaltar que, embora o FMEA forneça uma ferramenta poderosa para identificação de riscos, ela apresenta limitações, como a subjetividade na atribuição dos índices e o fato de não considerar interações entre modos de falha. Portanto, recomenda-se integrar o FMEA a outras ferramentas de gestão de risco (como a Análise de Árvore de Falhas) e monitorar continuamente a eficácia das ações implantadas, consolidando o ciclo de melhoria contínua (PDCA) e a cultura de prevenção.

Com base nos resultados obtidos e nos índices de RPN identificados, fica evidente a necessidade de priorizar as falhas mais críticas e de direcionar as ações corretivas e preventivas de forma eficaz. A identificação desses riscos permite não apenas a redução de falhas e paradas inesperadas, mas também a ordem de priorização de ações de melhorias processo, elevando os padrões de confiabilidade e segurança operacional. Nesse sentido, a criação de um *framework* estruturado é essencial para sistematizar e organizar as ações recomendadas, garantindo que cada modo de falha seja tratado com o nível de prioridade adequado segundo o índice de RPN. Esse framework não apenas traduz os dados do FMEA em um guia prático, mas também facilita o monitoramento, a comunicação e o acompanhamento das medidas adotadas, servindo como ferramenta de apoio à gestão de riscos e à tomada de decisões no ambiente industrial.

Figura 11: Framework de ações de melhorias para os RPN elevados

Modo de falha	RPN	Controle atual	Ações de melhoria
Obstrução da bica da expander	180	Monitoramento pela amperagem do Redler e Rosca transportadora	<ul style="list-style-type: none"> • Implementar sistema de aspiração contínua; • Intensificar limpeza programada e inspeções diárias; • Melhorar a ventilação da massa.
Obstrução do corpo da expander	140	Acompanhamento do aumento da amperagem	<ul style="list-style-type: none"> • Implementação de sensores de detecção de obstruções ou separadores magnéticos; • Padronização e checklist nos procedimentos de manutenção; • Adotar procedimentos padronizados de limpeza.
Falha mecânica no equipamento	105	Manutenção preventiva do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Melhorar plano de manutenção preventiva e preditiva; • Incluir inspeções com termografia e ultrassom; • Treinar equipe para identificar sinais de desgaste.
Falhas externas que causam parada	96	Manutenção preventiva do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Reforçar comunicação entre áreas; • Elaborar planos de contingência para falhas externas; • Atualizar cadastro de falhas externas críticas.

Fonte: Autora (2025).

5.1 Medidas para Mitigação da Obstrução na bica da expander

Para mitigar o risco identificado no modo de falha “Obstrução na bica de entrada da expander”, propõe-se a implementação de um sistema de aspiração contínua. Smith e Hawkins (2004) destacam que: “a aspiração contínua e a limpeza sistemática são práticas essenciais para prevenir o acúmulo de materiais que podem causar obstruções e falhas operacionais”, logo essa medida visa remover, de maneira automática e constante, partículas soltas e materiais finos que se acumulam durante o transporte da massa, evitando a formação de obstruções que impactam diretamente a performance do equipamento, vale ressaltar que a implementação de sistemas de aspiração contínua está alinhada com as diretrizes da ISO 55000 (2014), que enfatiza a importância da gestão eficaz de ativos para alcançar um equilíbrio entre desempenho, riscos e custos. Para isso, podem ser utilizadas linhas de aspiração instaladas ao longo do transportador

e da bica de entrada, conectadas a ventiladores industriais com capacidade de ajuste automático, permitindo que o sistema opere conforme a demanda do processo.

Além disso, recomenda-se intensificar a limpeza programada e as inspeções diárias nos pontos críticos da linha de produção. Essa prática contribui para identificar rapidamente acúmulos de material ou sinais de obstrução iminente, garantindo uma ação corretiva imediata, conforme apontado por Wirenam (2005) e Mobley (2002). Para isso, podem ser criados checklists padronizados para inspeções visuais diárias e partidas da planta, complementados pelo monitoramento de amperagem dos transportadores e roscas, indicadores que permitem detectar alterações no fluxo de massa. Conforme Parida e Kumar (2016) essa padronização das inspeções por meio de checklists facilita a sistematização do processo, assegurando a consistência e a eficácia na identificação de falhas.

Por fim, a melhoria da ventilação da massa é essencial para evitar o excesso de umidade que favorece a formação de compactações. Isso pode ser alcançado ajustando a configuração dos ventiladores existentes, aumentando a capacidade de exaustão nos pontos críticos ou até mesmo reavaliando o sistema de entrada e saída de ar. Tais ajustes contribuem para reduzir a umidade residual e melhorar a fluidez da massa, prevenindo bloqueios que geram paradas não programadas. Essas ações do sistema de aspiração contínua, limpeza e inspeções diárias são fundamentais para aumentar a confiabilidade do processo, reduzir a severidade e ocorrência da falha e, conseqüentemente, diminuir o RPN identificado no estudo.

5.2 Medidas para Mitigação da Obstrução no corpo da expander

Para mitigar os riscos associados ao modo de falha “Obstrução do corpo da expander”, é fundamental a implementação de sensores para a detecção de obstruções ao longo do corpo da expander e nas áreas críticas de alimentação. Sensores baseados em tecnologias como ultrassom, análise de vibração, pressão e separadores magnéticos possibilitam o monitoramento em tempo real do fluxo de massa, permitindo a identificação precoce de alterações indicativas do início de obstruções. Estudos realizados por Christof *et al.* (2020), Stansfeld e Metcalf (1995) e Bhagat *et al.* (2019) evidenciam a eficácia desses métodos na detecção antecipada de falhas ou fluxo de material estranho, corroborando sua aplicabilidade em ambientes industriais. Essa abordagem está inserida na manutenção preditiva, a qual se fundamenta na utilização sistemática de técnicas de monitoramento e análise para identificar fenômenos tais como variações nos níveis de vibração de equipamentos rotativos, contaminação de lubrificantes e oscilações nos níveis de pressão (Gregório, 2012). Essa perspectiva encontra respaldo na pesquisa da Metso Outotec (2023), que demonstra que a adoção da manutenção preditiva

baseada em sensores contribui significativamente para a redução das paradas não programadas e dos custos operacionais, pois quando o grau de degradação do equipamento se aproxima ou atinge limites previamente estabelecidos, a decisão de intervenção é tomada, permitindo um planejamento prévio (Kardec e Nascif, 2009).

Para mitigar esse tipo de falha, é fundamental a elaboração de Procedimentos Operacionais Padronizados (POPs), que descrevam de forma clara e detalhada todas as etapas do processo de limpeza e manutenções preventivas incluindo a frequência das atividades. Além disso, cada manutenção realizada deve ser acompanhada de um checklist específico, contendo todos os itens e ferramentas utilizados, a fim de garantir que nenhuma peça ou ferramenta seja deixada no interior dos equipamentos após a intervenção. Além disso, é importante capacitar os operadores e a equipe de manutenção para seguir rigorosamente esses procedimentos, como destacado por Santos *et al* (2024), que ressalta que a eficácia do FMEA depende diretamente da implementação de práticas operacionais consistentes e bem definidas.

5.3 Medidas para Mitigação de Falhas mecânicas na expander

No contexto das falhas mecânicas identificadas na expander, que apresentou um RPN elevado no estudo FMEA, a primeira ação proposta é a melhoria do plano de manutenção preventiva e preditiva, em alinhamento com as diretrizes da norma ISO 55000 (2014). Essa etapa visa estabelecer cronogramas de manutenção mais rigorosos e específicos, baseados no histórico de falhas já levantado, como destacado por Castro (2022) e Santos *et al.* (2024), que aplicaram o FMEA para identificar modos de falha críticos e desenvolver cronogramas de atividades preventivas em seus estudos. De acordo com Ali & Khayal (2023), uma abordagem estruturada para manutenção envolve um processo sistemático de inspeção, manutenção e reparo de máquinas para garantir a operação eficiente e a redução de falhas. Um plano de manutenção preventiva, ao abordar proativamente possíveis problemas, contribui para o aumento da confiabilidade das máquinas, como demonstrado por Medina & Tejada (2022). A revisão completa do histórico de falhas e intervenções corretivas do equipamento é essencial para tornar o plano de manutenção mais eficaz, permitindo antecipar falhas e garantindo maior confiabilidade e disponibilidade operacional (Jardine, 2021). Considerando que o histórico de falhas mecânicas da expander já foi levantado por meio desse estudo, recomenda-se utilizar essas informações como base para aprimorar e implementar um plano de manutenção preventiva e preditiva eficaz. Com os modos de falha identificados e classificados em termos de criticidade, o próximo passo é definir e priorizar as ações de manutenção para mitigar cada

risco identificado. Para isso, deve-se estabelecer um cronograma de inspeções e intervenções preventivas que leve em conta a frequência e a severidade das falhas apontadas no FMEA.

Outro ponto de melhoria é voltado a inclusão de inspeções com termografia e inspeção, voltados a manutenção preditiva, ambas são capazes de identificar anomalias antes que elas se tornem falhas críticas, contribuindo diretamente para a confiabilidade e disponibilidade dos ativos. A implementação conjunta dessas tecnologias melhora significativamente o plano de manutenção preditiva já estabelecida nas tratativas anteriores, oferecendo uma visão detalhada em tempo real e não invasiva das condições operacionais dos equipamentos no processo industrial.

A equipe de manutenção deve ser capacitada para realizar inspeções visuais, medições dimensionais, reapertos de fixadores e ajustes operacionais, sempre seguindo as recomendações do fabricante e as melhores práticas do setor. Além disso, é essencial promover o treinamento contínuo da equipe operacional e de manutenção para identificar sinais iniciais de desgaste, como ruídos anormais, vibrações excessivas e alterações de temperatura que podem indicar falhas iminentes. Essa capacitação garante que as intervenções sejam realizadas no momento adequado, evitando danos mais severos. Segundo Joklecar (2019), o treinamento dos operadores e a conscientização sobre as condições normais de operação são pilares fundamentais para reduzir a ocorrência e a severidade das falhas. Complementarmente, todos devem compreender as causas raiz dos problemas e saber como preveni-los ou corrigi-los rapidamente.

5.4 Medidas para Mitigação de falhas externas na expander

No caso de falhas externas que afetam diretamente o desempenho da expander e que apresentaram um RPN elevado, recomenda-se reforçar a comunicação entre as áreas envolvidas no processo produtivo visto que Henni *et al.* (2024) em seu estudo salientou sobre a troca de informações entre departamentos ser fundamental para identificar e eliminar rapidamente pontos críticos que afetam a confiabilidade do sistema. Essa comunicação pode ser aprimorada por meio da criação de canais formais e estruturados para troca de informações, como reuniões periódicas de alinhamento entre os setores de operações, manutenção e utilidades. Além disso, a implementação de sistemas digitais integrados, como softwares de gestão de produção (ERP ou MES) que de acordo com Jardine *et al.* (2021) e Gibson e Groom (2024), a colaboração contínua entre áreas e o uso de plataformas digitais são fatores-chave para melhorar a eficiência operacional e reduzir falhas não planejadas, além de facilitar o monitoramento e a tomada de decisão em tempo real.

Outra ação importante é a elaboração de planos de contingência específicos para lidar com as principais falhas externas identificadas. Esses planos devem incluir diretrizes claras sobre como proceder em casos de indisponibilidade de vapor, energia ou matéria-prima, por exemplo, assegurando a continuidade das operações ou uma parada segura e controlada. De acordo com Surchi (2024) e Silva (2024), a implementação de planos de contingência eficazes contribui significativamente para reduzir a severidade e a ocorrência de falhas que não estão sob o controle direto do processo principal. Além disso, recomenda-se atualizar regularmente o cadastro de falhas externas críticas, registrando dados como frequência de ocorrência, causas, impacto e ações tomadas. Esse histórico atualizado permite identificar tendências e padrões que facilitam a prevenção e a mitigação de riscos no futuro. Joklecar (2019) destaca que a análise de dados históricos é uma ferramenta poderosa para aprimorar o gerenciamento de falhas e direcionar esforços de manutenção e melhoria contínua.

Essas ações reforço da comunicação entre áreas, planos de contingência claros e atualização constante dos cadastros de falhas formam um conjunto integrado e essencial para reduzir o impacto de falhas externas na expander, contribuindo para a melhoria da confiabilidade operacional e a redução do RPN identificado no estudo de FMEA. Além disso, é fundamental que a FMEA seja revista e atualizado periodicamente após a implementação das ações corretivas e preventivas. Sendo possível identificar se houve redução efetiva dos índices de risco (RPN) e pontuar novos pontos de melhoria. Segundo Jardine *et al.* (2021), a FMEA deve ser considerado um processo dinâmico e cíclico, no qual a reavaliação contínua garante que as ações adotadas sejam realmente eficazes e que novas ameaças sejam prontamente identificadas. De acordo com Kardos *et al.* (2021) e Henni *et al.* (2024), a revisão constante do FMEA não apenas confirma a mitigação de riscos, mas também favorece a cultura de melhoria contínua e o engajamento das equipes na identificação proativa de falhas. Em complemento, Henni *et al.* (2024) destacam que essa prática ajuda a consolidar o alinhamento entre áreas operacionais, manutenção e engenharia, criando um ambiente colaborativo essencial para a confiabilidade do processo.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo aplicar a ferramenta *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) para identificar, analisar e priorizar as principais falhas que afetam o desempenho da Expandex. Através do mapeamento detalhado do processo e da avaliação de causas e efeitos, foi possível elaborar um plano de ação que contempla medidas preventivas e corretivas, visando aumentar a confiabilidade operacional do equipamento e mitigar impactos negativos no

desempenho industrial. Os resultados revelaram 13 modos de falha, avaliados por severidade, ocorrência e capacidade de detecção. Os maiores RPNs concentraram-se, em sua maioria, em falhas mecânicas, problemas de limpeza e ausência de inspeção visual em campo. Essas falhas provocam paradas não programadas, reduzindo a produtividade da planta e gerando desperdício de mão de obra. As ações corretivas recomendadas variam desde ajustes em parâmetros operacionais até medidas estruturais, como a implementação de sistemas de aspiração contínua e o reforço na rotina de inspeções, além de maior implementação da manutenção preditiva. Ao adotar o FMEA como ferramenta de apoio à decisão, obteve-se uma visão preventiva e estruturada do processo, permitindo a priorização de recursos e a proposição de melhorias com base em critérios objetivos. O monitoramento contínuo dos RPNs, aliado à revisão periódica das ações implementadas, é imprescindível para avaliar a eficácia das medidas propostas e garantir a eficiência do equipamento. Como resultado, espera-se a redução de paradas não programadas, o aumento da disponibilidade da expander e a maior estabilidade do processo produtivo. Consequentemente, amplia-se a confiabilidade operacional, o que se traduz em maior eficiência na extração de óleo, redução de perdas, redução de custos e melhoria da produtividade global da unidade. Dessa forma, o FMEA comprova seu papel como ferramenta essencial para o gerenciamento proativo de riscos operacionais, não apenas mitigando falhas, mas também fundamentando a tomada de decisões em dados concretos e fortalecendo a cultura de excelência operacional no ambiente industrial. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação de outras ferramentas complementares, como o Diagrama de Ishikawa (espinha de peixe) para análise mais detalhada das causas das falhas e a Análise de Árvore de Falhas (FTA), que pode fornecer uma visualização hierárquica das causas raiz, ajudando a priorizar intervenções de forma ainda mais eficaz. Dessa forma, espera-se que a continuidade do acompanhamento e a integração de novas ferramentas fortaleçam ainda mais o sistema de gestão de falhas, contribuindo para um ambiente de trabalho mais seguro, eficiente e alinhado com as melhores práticas industriais.

REFERÊNCIAS

ABIOVE – Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. Página inicial. Disponível em: <https://www.abiove.org.br>. Acesso em: 12 jan. 2025.

ABIOVE – Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. Estatísticas do setor de óleos vegetais 2024. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.abiove.org.br>. Acesso em: 04 maio 2025.

ABIOVE. Estatística. São Paulo: Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2023. Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ABIOVE. Produção de soja e seus derivados. Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2024. Disponível em: www.abiove.org.br. Acesso em: 01 jun. 2025.

ABIOVE; CEPEA. Relatório de Impacto Econômico da Cadeia da Soja e Biodiesel. São Paulo: ABIOVE/ESALQ-USP, 2024. Disponível em: <https://abiove.org.br>. Acesso em: 04 maio 2025.

ALLOCCO. Laminador. 2020. Disponível em: <https://allocco.com.ar/productos/laminador/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ANEC. Exportações Acumuladas. São Paulo, SP: Associação Nacional dos Exportadores de Cereais, 2023. Disponível em: <https://anec.com.br/article/anec-exportacoes-acumuladas-532022>. Acesso em: 10 de junho de 2023.

ANTOS, A. R.; LIMA, M. D.; SILVA, F. G. Processos de laminação e seus efeitos na extração de óleo de soja. *Revista Brasileira de Engenharia de Alimentos*, v. 40, n. 1, p. 34–42, 2017.

ANTUNES, A. M.; CORRÊA, J. L. G.; CARVALHO, E. R. Drying of soybean seeds and its influence on quality: a review. *Australian Journal of Crop Science*, [s. l.], n. 18(05), p.

AREMU, M. O. et al. Optimization of the operating variables for the extraction of soy oil in a single screw expeller using a central composite design (CCD). *Croatian Journal of Food Science and Technology*, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 210–221, 2019. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/file/334991>. Acesso em: 19 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO DE AGRICULTORES E IRRIGANTES DA BAHIA (AIBA). Conselho Técnico da AIBA apresenta resultados da safra 2023/24 e projeções para 2024/25. Disponível em: <https://aiba.org.br/conselho-tecnico-da-aiba-apresenta-resultados-da-safra-2023-24-e-projecoes-para-2024-25/>. Acesso em: 18 jan. 2025.

AVELAR, B. R.; FREIRE, E. C. Adequação do consumo de vapor direto em um dessolventizador-tostador de farelo de soja. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Química, Ponta Grossa, 2018. Orientador: Cesar Arthur Martins Chornoba. BĂNUȚĂ, A.; TIȚA, M. Technology and Equipment for Oilseed Processing. Sibiu: “Lucian Blaga” University of Sibiu, 2023.

- BELÉIA, A. D. P.; MANDARINO, J. M. G. Derivados da soja. In: MANDARINO, J. M. G.; IDA, E. I. (Org.). Soja: qualidade, composição e potencialidades. Londrina: Embrapa Soja, 2006. p. 143–174.
- BHAGAT, A. et al. A device to monitor and detect obstruction in an endotracheal tube. 2019. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/WO2019186589A1/en>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- BOGALHOS, G. H. Viabilidade econômica da utilização de massa expandida de soja na extração de óleos. ASSENAAGRO, 2022. Disponível em: <https://assenaagro.com.br/viabilidade-economica-da-utilizacao-de-massa-expandida-soja-na-extracao-de-oleos/>. Acesso em: 4 maio 2025.
- BOGNÁR, F.; BENDEK, P. Case study on a potential application of failure mode and effects analysis in assessing compliance risks. *Risks*, v. 9, n. 9, p. 164, 2021. DOI: 10.3390/risks9090164.
- BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Arco Norte é principal eixo de escoamento para exportações do Matopiba. 2024. Disponível em: https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5496-arco-norte-e-principal-eixo-de-escoamento-para-exportacoes-do-matopiba?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 18 jan. 2025.
- BÜHLER GROUP. Manual de equipamentos para processamento de soja. 2015. Disponível em: <https://www.buhlergroup.com/global/pt/products/soya-processing.html>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- CASTRO, O. V. T. de. Aplicação de plano de manutenção preventiva em caldeira mista com auxílio da ferramenta FMEA. Universidade Federal de Santa Catarina, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/237671>. Acesso em: 4 maio 2025.
- CAVAIGNAC, A. L. O.; UCHOA, J. G. L.; SANTOS, H. F. O. Risk analysis and prioritization in water supply network maintenance works through the failure modes and effects analysis: occupational safety FMEA application. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, v. 17, n. 1, e2020887, 2020. DOI: 10.14488/BJOPM.2020.006.
- CHERAGHI, M.; ESLAMI BALADAH, A.; KHAKZAD, N. A fuzzy multi-attribute HAZOP technique (FMAHAZOP): Application to gas wellhead facilities. *Safety Science* [online], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.12.024>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- CLAUX, O.; RAPINEL, V.; ABERT-VIAN, M.; CHEMAT, F. Green extraction of vegetable oils: from tradition to innovation. In: *Sustainable food science: a comprehensive approach*. [s.l.]: Elsevier, 2023. Cap. 4.15, p. 271–283. DOI: 10.1016/B978-0-12-823960-5.00027-5.
- CNA – Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. [Título da página ou documento específico]. Brasília: CNA, 2024. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Boletim da Safra de Grãos – Brasil – Abril 2025. Brasília: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 4 maio 2025.
- CORSBY, C. L. T.; TOWNSEND, R. Participant observation. [s.l.], p. 189–198, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9781003381891-24>. Acesso em: 15 fev. 2025.

COSTA, A. I. L.; ROSA, M.; DIOGO, P. Considering participant observation methods for nursing qualitative research. *The Qualitative Report*, [s.l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.46743/2160-3715/2024.7647>. Acesso em: 22 fev. 2025.

COSTA, D. O. S. et al. Aplicação do FMEA: estudo de caso voltado para análise de confiabilidade do sistema logístico de transporte em uma empresa de recicláveis. 2022. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/download-post/84706>. Acesso em: 22 fev. 2025.

CRUZ, S. P. S. Implementação de uma FMEA no caso de uma luminária. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) – Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial, Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.

DASIC, P.; VUKOVIC, M. Integrated approach of quantitative and qualitative methods in engineering process optimization. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 19, n. 3, p. 112–125, 2024.

DOUGLAS, B.; TOOLEY, C. E. S. Bio-refinery of oilseeds: oil extraction, secondary metabolites separation towards protein meal valorisation—A review. *Processes*, [S.l.], v. 10, n. 5, p. 841, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr10050841>. Acesso em: 02 abr. 2025.

ELSTNER, F. Expander zur Verarbeitung von Ölsaaten. *Fett-lipid*, [S.l.], v. 99, n. 4, p. 147–152, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/LIPI.19970990408>. Acesso em: 05 jan. 2025.

EMBRAPA. Armazenamento do grão de soja com qualidade: princípios importantes a serem observados. Circular Técnica 196. Londrina: Embrapa Soja, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1155426/1/Circ-Tec-196.pdf>. Acesso em: 26 maio 2025.

EMBRAPA. Secagem e Armazenamento. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/colheita-e-pos-colheita/secagem-e-armazenamento>. Acesso em: 1 fev. 2025.

EMBRAPA. Sistema de produção da soja: região central do Brasil. 3. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2013.

EMOM, R. Mixed methods: combining quantitative and qualitative research for broader insights. *International Journal of Research Methodology*, v. 15, n. 1, p. 45–60, 2024.

FAO. The future of food and agriculture – Drivers and triggers for transformation. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <www.fao.org>. Acesso em: 01 jun. 2025.

FONTES, A. V. Processo de industrialização da soja no Brasil. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, Uberlândia, 2019.

- FREITAS, R. N. et al. Processamento de soja: etapas e tecnologias para otimização da extração de óleo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 6, p. 401–407, 2017. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n6p401-407.
- GAFFELD, A. M. Impacto do crescimento da produção de soja no setor de esmagamento de grãos. *Revista de Agronegócios, Piracicaba*, v. 15, n. 3, p. 45–58, 2021.
- GAFFELD, Katelyn N. et al. A review of soybean processing byproducts and their use in swine and poultry diets. *Translational Animal Science*, v. 8, txae063, 2024. Advance access publication 13 Apr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/tas/txae063>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- GARCÍA, M.; PÉREZ, J.; LÓPEZ, R. Implementation of FMEA in complex industrial systems: Benefits and challenges. *International Journal of Industrial Engineering*, v. 30, n. 1, p. 55-67, 2023.
- GARCIA, R. C. FMEA de processo: um método de prevenção de falhas em processos industriais. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/X7444dSG5t9gpYMc65Dv8Wh/>. Acesso em: 30 maio 2025.
- GHOULIA, Zahia; SEHAILIA, Moussa; CHEMAT, Smain. Vegetable oils and fats: extraction, composition and applications. In: *Advances in science, technology & innovation*. [S.l.]: Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-3810-6_12. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/334309417>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- GIBSON, A.; GROOM, L. The value of case study in industrial contexts. *Journal of Business Research*, v. 38, n. 2, p. 88–97, 2024. ISBN 9781003381891.
- GUAN, X. Process for extracting oil from waste oil sludge. Concessão: 16 nov. 2018.
- GUARIENTI, E. P. O solvente hexano no processo de extração de óleo de soja. Projeto de Estágio de Conclusão de Curso – Faculdade Três de Maio. Três de Maio, 2009.
- HASAN EMON, M. M. Research approach: a comparative analysis of quantitative and qualitative methodologies in social science research. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.20944/preprints202412.1128.v1>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- HEMING, Flávio Luis Bueno. Armazenagem de grãos: limpeza. Curitiba: SENAR-PR, 2016. 1 v. ISBN 978-85-7565-134-6.
- HENNI, H. et al. Development of supply chain risk mitigation to develop an effective strategy for small and medium enterprises. *Logistic and Operation Management Research*, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 17–27, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.31098/lomr.v3i1.1553>.
- HENNI, H. et al. Development of Supply Chain Risk Mitigation to Develop an Effective Strategy for Small and Medium Enterprises. *Logistic and Operation Management Research*, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 17–27, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.31098/lomr.v3i1.1553>.
- HUANG, Zhijie et al. Recent advances in soybean protein processing technologies: a review of preparation, alterations in the conformational and functional properties. *International*

Journal of Biological Macromolecules, v. 248, p. 125862, 1 set. 2023. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125862.

HUBER, C.; SCHÜTZE, C.; MUNDSCHIN, D.; SCHWENTER, B.; RAMSEYER, S.; WERNER, M. Sensor for measuring the mass flow rate of a flowable medium. 2020. Disponível em: <https://www.freepatentsonline.com/y2020/0166397.html>. Acesso em: 12 jan. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 55000:2014 – Asset Management — Overview, Principles and Terminology. 2014. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/55088.html>. Acesso em: 2 jun. 2025.

JABLAOUI, C. et al. Comparison of expander and Instant Controlled Pressure-Drop DIC technologies as thermomechanical pretreatments in enhancing solvent extraction of vegetal soybean oil. *Arabian Journal of Chemistry*, [S.l.], v. 13, n. 10, p. 7235–7246, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2020.08.005>. Acesso em: 12 jan. 2025.

JARDINE, Andrew K. S.; TSAI, Roger; GAVIN, Sandy. Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications. 3. ed. CRC Press, 2021.

KANG, J.; SUN, L.; SUN, H.; WU, C. Risk assessment of floating offshore wind turbine based on correlation-FMEA. *Ocean Engineering*, v. 129, p. 382-388, 2017.

KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção: função estratégica. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KARDOS, J.; LAHUTA, I.; HUDÁKOVÁ, M. Modificação da aplicação do método FMEA para a organização de eventos de corrida: melhoria da segurança e qualidade das maratonas. 2021. Disponível em: <https://ojs.scientificmanagementjournal.com/ojs/index.php/smj/article/view/739>. Acesso em: 22 fev. 2025.

KARDOS, Peter; LAHUTA, Patrik; HUDAKOVA, Maria. Risk assessment using the FMEA method in the organization of running event. Faculty of Security Engineering, Department of Crisis Management, University of Zilina, 2021. Publicado por ELSEVIER B.V. Artigo de acesso aberto sob a licença CC BY-NC-ND. Disponível em: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. Acesso em: 12 jan. 2025.

KOHLI, V.; SINGHA, S. Protein digestibility of soybean: how processing affects seed structure, protein and non-protein components. *Discover Food*, [S.l.], 2024.

KOHLI, V.; SINGHA, S. Protein digestibility of soybean: how processing affects seed structure, protein and non-protein components. *Discover Food*, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00076-w>

KUMAR, P.; AGRAWAL, R.; KUMAR, A. Technological advancements in vegetable oil extraction processes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 143, p. 110-119, 2021.

LAZĂR, E.-I.; TIȚA, O. The importance of wheat conditioning in the production of wholemeal flours. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.61458/jepm23010131>. Acesso em: 22 fev. 2025.

LEAL, F.; PINHO, A. F. de; ALMEIDA, D. A. de. Análise de falhas através da aplicação do FMEA e da teoria Grey. *Revista Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Ponta Grossa*, v. 2, n. 1, p. 78–88, 2006. DOI: 10.3895/S1808-0448200600010000.

LI, Q.; ZHANG, Y.; LI, G. High-efficient rotary type dryer capable of uniformly distributing materials. *Concessão*: 27 mar. 2013.

LIMA, D. U.; GOMES, S. T. *Processos industriais na cadeia da soja*. São Paulo: Editora Blucher, 2020.

LOPES, M. L. C. Processamento de oleaginosas. In: NEGRÃO, C. O.; MOURA, N. F. (Orgs.). *Tecnologia de alimentos de origem vegetal*. São Paulo: Atheneu, 2008. p. 295–318.

MAGALHÃES, W. R.; LIMA JUNIOR, F. R. A model based on FMEA and Fuzzy TOPSIS for risk prioritization in industrial processes. *Gestão & Produção*, v. 28, n. 4, p. e5535, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2020v28e5535>.

MANDARINO, J. M. G.; HIRAKURI, M. H.; ROESSING, A. C. *Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos*. 2. ed. Londrina: Documentos Embrapa Soja, 2015. 43 p. Disponível em: [Doc171OL.pdf](#). Acesso em: 25 jan. 2025.

MEDINA, Y. L.; TEJADA, Y. V. Confiabilidad en el rendimiento de las máquinas de producción gracias al plan de mantenimiento preventivo. *Deleted Journal*, v. 2, n. 3, p. 35–47, 2022. DOI: <https://doi.org/10.62319/criterio.v.2i3.11>

MOBLEY, R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2. ed. Burlington: Elsevier, 2002.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 11. ed. New York: John Wiley & Sons, 2024.

MOTA, R.; CAVAINAC, S. FMEA aplicado na melhoria de processos industriais. *Revista Brasileira de Engenharia de Produção*, v. 15, n. 3, p. 45–57, 2019.

MUSCHELKNAUTZ, E.; GREIF, V. Cyclones and other gas—solids separators. Em: [S. l.]: Springer, Dordrecht, 1997. p. 181–213. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-009-0095-0_6

NAZARENKO, I. I.; MESCHUK, E. O. Dinâmica da tela vibratória considerando a influência do equipamento de classificação – o material em seus parâmetros de trabalho. *Technical Bulletin*, [s.l.], v. 1-38, 2023. DOI: 10.32347/tb.2023.1-38.0201.

OLIVEIRA Júnior, A. de, Chiari da Silva, E. C., & Garcia Hermosilla, J. L. (2020). Um estudo de aplicação do método FMEA: pesquisa-ação em um processo de fabricação de uma empresa de grande porte do setor metal mecânico. *Brazilian Journals of Business*, 2(3), 1898-1912. <https://doi.org/10.34140/bjbv2n3-004>

OLIVEIRA, Carla M. et al. Equipamentos para limpeza e classificação de grãos na indústria de soja. *Jornal de Tecnologia Agrícola*, v. 8, n. 2, p. 120-130, 2020.

OLIVEIRA, P. et al. Gestão de impurezas na soja para otimização do processamento industrial. Campinas: Editora Técnica, 2021.

PALADY, P. FMEA: Failure Modes and Effects Analysis. 2. ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2004.

PARIDA, A.; KUMAR, U. Maintenance performance measurement (MPM): issues and challenges. *International Journal of Productivity and Performance Management*, v. 65, n. 3, p. 450-471, 2016. DOI: 10.1108/IJPPM-02-2015-0020.

PENG, Y. et al. Triple-product cyclone micro bubble flotation column separation device. Concessão: 19 mar. 2014.

POLITIEK, R. et al. Effect of oil content on pin-milling of soybean. *Journal of Food Engineering*, [s. l.], v. 334, p. 111149, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111149>

RANI, H., Sharma, S., & Bala, M. (2021). Technologies for extraction of oil from oilseeds and other plant sources in retrospect and prospects: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(9), e13851. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13851>

REVISTA MANUTENÇÃO. Inovações em Dispositivos para Redução de Paradas Não Programadas. 2024. Disponível em: <https://revistamanutencao.com.br>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ROQUE, Teresa Manuela Varandas. Análise das perdas de hexano numa unidade de extração de óleos e bagaços: caso de estudo Iberol. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

SANKAR, N. R.; PRABHU, B. S. Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 18, n. 3, p. 324–336, 2001.

SANTOS, E. et al. Aplicação da metodologia FMEA em um processo de usinagem. *Caderno Pedagógico*, [S.l.], v. 21, n. 6, p. e5117, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n6-216>. Acesso em: 22 fev. 2025.

SANTOS, F. L. dos et al. Estudo de caso para implementação de manutenção preditiva em indústria metalúrgica na Região Metropolitana de Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2024. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/88362>

SANTOS, L. F.; PEREIRA, J. P. Tecnologia de processamento de alimentos: foco em grãos e sementes. São Paulo: Editora Agropecuária, 2018.

SANTOS, Raphael Pousa dos. Rainfall variability and availability of water resources in the last 40 years in Western Bahia, Brazil. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade Federal do Oeste do Pará, 2022.

SHAHZAD, B.; SAFVI, S. A. Risk Mitigation And Management Scheme Based On Risk Priority. *Global journal of computer science and technology*, [s. l.], 2010. Disponível em: https://globaljournals.org/GJCST_Volume10/gjst_vol10_issue4_25.pdf

SHARMA, R. K.; SRIVASTAVA, R. L. Critical analysis of FMEA approaches to improve quality. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 34, n. 7, p. 1042–1062, 2017.

SILVA, A. S.; SOUSA, P. L.; ALMEIDA, R. P. *Tecnologia de Expansão: Processos e Equipamentos*. 2. ed. São Paulo: Editora ABC, 2021.

SILVA, F. M.; COSTA, R. S. *Processamento de grãos: técnicas e inovações*. Rio de Janeiro: Editora Técnica, 2019.

SILVA, Gesner Brehmer de Araújo. A inserção da Bahia na economia internacional no biênio 2019/2020. *Journal*, v. 19, n. 33, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22481/ccsa.v19i33.10466>.

SILVA, H. P. da. The importance of a contingency plan. *Revista Gênero e Interdisciplinaridade*, [s. l.], v. 5, n. 05, p. 253–280, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.51249/gei.v5i05.2254>

SILVA, Monica Nardini da; ANJOS, Flávio Sacco dos. A expansão da soja no município de Jaguarão/RS: análise das percepções através da abordagem narrativa. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, [S.l.], v. 58, n. 3, p. 1-13, 2020. DOI: 10.1590/1806-9479.2020.213748. Disponível em: revistasober.org. Acesso em: 9 mar. 2025.

SILVA, R. A.; BERTONCELLO, A. G. A competitividade da soja brasileira e seus impactos econômicos. *Revista de Economia e Agronegócio*, v. 15, n. 1, p. 25–44, 2017.

SMITH, R.; HAWKINS, B. *Lean Maintenance: reduce costs, improve quality, and increase market share*. Burlington: Elsevier, 2004.

SOUZA, J. et al. *Processamento e qualificação de soja para extração de óleo*. São Paulo: Editora da Universidade, 2019.

STAMATIS, D. H. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution*. 2. ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003.

STANSFELD, J. W.; METCALF, E. *Mass flow sensor*. Concessão: 9 jun. 1995.

STERNLICHT, Alexandra. 26-year-old Alex Rodrigues becomes youngest current CEO of a publicly traded company with \$5 billion Embark SPAC merger. *Forbes*, 11 nov. 2021. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/alexandrasternlicht/2021/11/11/26-year-old-alex-rodrigues-becomes-youngest-current-ceo-of-a-publicly-traded-company-with-5-billion-embark-spac-merger/>. Acesso em: 12 jan. 2025.

SUKANIA, I. W. Identification of the most potential defects and caused by using metode failure mode and effect analysis (fmea) in pt x. [s. l.], v. 1, 2014.

SURCHI, A. Factors Shaping Organizational Contingency Plans: Insights into Risk Management and Preparedness. *OTS Canadian Journal*, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 1–10, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.58840/jmvzbc40>

Técnico da AIBA apresenta resultados da safra 2023/24 e projeções para 2024/25. Disponível em: <https://aiba.org.br/conselho-tecnico-da-aiba-apresenta-resultados-da-safra-2023-24-e-projecoes-para-2024-25/>. Acesso em: 18 jan. 2025.

TMSA – Tecnologia em Movimentação S/A. Biomassa, Pellets, Rações. Disponível em: <https://www.tmsa.ind.br/atuacao/biomassa-pellets-racoes/>. Acesso em: 30 maio 2025.

TNL TECNAL. Rotary Conditioners. São Carlos, 2025. Disponível em: <https://www.tecnal.ind.br/produto/22/rotary-conditioners>. Acesso em: 13 abr. 2025.

TOLEDO, J. C. de; BORRÁS, M. A. A.; MERGULHÃO, R. C.; MENDES, G. H. S. *Qualidade: gestão e métodos*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

TSUBOI, N. et al. Expander and binary power generation device. Concessão: 26 mar. 2020.

TURNER, J.; EVANS, R.; LEWIS, C. Flexibility in Research Methods: A Pathway to Deep Understanding. *Methodological Innovations*, v. 27, n. 1, p. 33–48, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/oso/9780197677797.003.0020>

VADKE, A. (2024). "Processos de Laminação e Extração de Óleos Vegetais". *Revista Brasileira de Processamento de Alimentos*, 35(2), 101-110.

VAGHASIYA, K. P.; PATEL, J. B.; SON DARVA, J. Effect of Pre-storage Seed Treatments on the Storage Potential in Soybean Seed [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Legume Research*, [2023], [1], DOI: <https://doi.org/10.18805/lr-5061>.

WANG, W.; LIU, X.; QIN, Y.; FU, Y. A risk evaluation prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral. *Safety Science* 110, 152-163, 2018.

WIREMAN, T. *Maintenance Planning, Scheduling, and Coordination*. 2. ed. Lilburn: Industrial Press, 2005.

YINGSUN, W.; LI, J.; ZHANG, L. Advances in the application of Expander technology in soybean processing. *Journal of Food Engineering*, v. 335, p. 111-120, 2023.

ZHAN, Siyi; DING, Liping; LI, Hui; SU, Aonan. Aplicação da Análise de Modos de Falha e Efeitos para Melhorar a Qualidade da Primeira Página de Registros Médicos Eletrônicos na China: Análise de Mapeamento de Dados Transversais. *JMIR Medical Informatics*, v. 12, e53002, p. 13, 2024. DOI: 10.2196/53002.