

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA QUALIDADE

MARILISA KASPRZAK
RAFAEL DOS SANTOS

ETANOL DE MILHO E *LEAN MANUFACTURING*:
APLICAÇÃO DO METODO A3 NA ETAPA DE FERMENTAÇÃO

CURITIBA
2025

MARILISA KASPRZAK
RAFAEL DOS SANTOS

ETANOL DE MILHO E *LEAN MANUFACTURING*:
APLICAÇÃO DO METODO A3 NA ETAPA DE FERMENTAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Engenharia da Qualidade 4.0 - Certificação Black Belt da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título Especialista em Engenharia da Qualidade.

Orientador: Pablo Deivid Valle

CURITIBA
2025

TERMO DE APROVAÇÃO

Os avaliadores do Trabalho de Conclusão de Curso dos alunos MARILISA KASPRZAK e RAFAEL DOS SANTOS do Curso de Especialização em Engenharia da Qualidade 4.0, da Universidade Federal do Paraná, realizaram avaliação do trabalho intitulado ETANOL DE MILHO E LEAN MANUFACTURING: APLICAÇÃO DO MÉTODO A3 NA ETAPA DE FERMENTAÇÃO. Após avaliação do trabalho são de parecer pela sua _____.

Curitiba, ____ de _____ de 2025.

PABLO DEIVID VALLE

RESUMO

O presente trabalho busca fazer uma análise baseada em uma metodologia de Lean Manufacturing de uma etapa do processo de produção de etanol de milho. Para manterem-se competitivas no mercado, as empresas precisam gerenciar continuamente seus processos produtivos em busca de maior eficiência, eliminação de falhas e desperdícios e assegurando a disponibilidade dos equipamentos produtivos, tendo neste cenário grande relevância a utilização de ferramentas de melhoria contínua que podem agregar aos processos em todos os sentidos apontados. Neste trabalho a metodologia escolhida para o estudo é o A3, e a etapa do processo escolhida para a análise é a fermentação. O estudo de caso prevê um aumento no rendimento do processo de fermentação de maneira a entregar 1% a mais de etanol hidratado no final do processo. Após a análise é realizada uma proposição de ações a serem empregadas fundamentadas no estudo para melhoria do processo, o que muito agrega para a competitividade das empresas no mercado, nesta em especial no mercado sucroalcooleiro.

Palavras-chave: Lean Manufacturing; Etanol de Milho; Metodologia A3; Fermentação.

ABSTRACT

This work seeks to conduct an analysis based on a Lean Manufacturing methodology of a stage in the corn ethanol production process. To remain competitive in the market, companies need to continuously manage their production processes in search of greater efficiency, elimination of failures and waste, and ensuring the availability of production equipment. In this scenario, the use of continuous improvement tools that can enhance the processes in all the mentioned aspects is of great relevance. In this work, the chosen methodology for the study is A3, and the stage of the process selected for analysis is fermentation. The case study predicts an increase in the yield of the fermentation process in order to deliver 1% more hydrated ethanol at the end of the process. After the analysis, a proposal for actions to be implemented based on the study for process improvement is made, which greatly contributes to the competitiveness of companies in the market, especially in the sugar and alcohol market.

Keywords: Lean Manufacturing; Corn Ethanol; A3 Methodology; Fermentation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Casa Toyota de Produção	21
FIGURA 2 - Correlação entre Ferramentas Lean e Tecnologias da Indústria 4.0	22
FIGURA 3 - Ciclo PDCA	24
FIGURA 4 - Modelo de Relatório A3	29
FIGURA 5 - Estrutura proposta para implementação da manufatura enxuta.....	33
FIGURA 6 - Roteiro implementação Lean	35
FIGURA 7 - Produção Global de Etanol por País ou Região	43
FIGURA 8 - Produção de Milho no Mato Grosso Safras 22/23, 23/24 e 24/25	44
FIGURA 9 - Fluxograma simplificado de massa e energia	52
FIGURA 10 - Processo simplificado de Produção de Etanol de Milho	54
FIGURA 11 - Fluxograma moagem seca	56
FIGURA 12 - Fluxograma via úmida	57
FIGURA 13 - Fluxograma simplificado processo SSF	63
FIGURA 14 - Biorrefinarias atuais e futuras.....	71
FIGURA 15 - Evolução da produção de milho desde 2005	72
FIGURA 16 - Projeção futura produção de etanol de milho	72
FIGURA 17 - Ishikawa para Análise da Causa Raiz - Processo de Fermentação Etanol de Milho	76
FIGURA 18 - A3 - Aumentar Rendimento da Fermentação Etanol de Milho	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Maiores produtores de Etanol.....	46
TABELA 2 - Componentes presentes no milho	58
TABELA 3 - Enzimas utilizadas no processo de etanol de milho	59
TABELA 4 - Receita Produtos e Coprodutos	70
TABELA 5 - Ações Propostas	80

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Indicador do Milho ESALQ/MB&FBOVESPA – Janeiro 2022 a Agosto 2024 para saca de 60 kg de milho.....	48
GRÁFICO 2 - Percentual do etanol por estado na produção nacional de etanol.....	51
GRÁFICO 3 - KPI para Granulometria.....	78
GRÁFICO 4 - KPI monitoramento pH e temperatura - Liquefação.....	78
GRÁFICO 5 - KPI monitoramento pH e temperatura - Fermentação	79
GRÁFICO 6 - Produção Diária de Etanol	80

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	OBJETIVO	14
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2.2	JUSTIFICATIVA	15
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1	<i>LEAN MANUFACTURING</i>	16
3.1.1	Antecedentes Históricos	16
3.1.2	Princípios do <i>Lean Manufacturing</i>	17
3.1.3	Os Oito Desperdícios <i>Lean</i>	18
3.1.4	Estrutura do Sistema Toyota de Produção (<i>Casa Lean</i>)	20
3.1.5	<i>Lean Manufacturing</i> E Indústria 4.0	22
3.1.6	Ferramentas do <i>Lean Manufacturing</i>	23
3.1.6.1	Ciclo PDCA	23
3.1.6.2	Procedimento Operacional Padrão	25
3.1.6.3	Programa 5S.....	25
3.1.6.4	<i>Lean Leadership</i>	26
3.1.6.5	<i>Kaizen</i>	27
3.1.6.6	Relatório A3	28
3.1.6.7	<i>Obeya</i>	30
3.1.7	Implementação do Sistema de Produção Enxuta	31
3.1.8	Casos de implementação do <i>Lean Manufacturing</i>	35
4.	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ETANOL	37
4.1	RESUMO HISTÓRIA DO ETANOL.....	37
4.1.1	Proálcool	39
4.1.1.1	Criação do Proálcool (1975)	39
4.1.1.2	Expansão do Proálcool (final da década de 1970 e anos 1980)	39
4.1.1.3	Crise do Proálcool e Reavaliação (fim da década de 1980 e início de 1990)..	40
4.1.1.4	Renascimento do Proálcool e Consolidação (anos 1990 e 2000)	40
4.1.1.5	Etanol e o Álcool como Biocombustível (2000 e 2010)	41
4.1.1.6	Atualidade do Proálcool (2010 até os dias atuais)	41
4.2	Etanol de Milho.....	42
4.2.1	Etanol de Milho – Mercado Global.....	42
4.2.2	Etanol de Milho – Mercado Brasileiro	46
4.2.3	Processo de Produção de Etanol de Milho	51
4.2.3.1	Cadeia do Etanol de Milho.....	51

4.2.3.2	Processo Produtivo de Etanol de Milho.....	53
4.2.3.2.1	Preparo Da Matéria-Prima	54
4.2.3.2.2	Moagem Do Milho - Via Seca X Via Úmida.....	55
4.2.3.2.3	Hidrólise Enzimática	58
4.2.3.2.4	Fermentação	63
4.2.3.2.5	Destilação – Obtenção de Etanol e Coprodutos.....	66
4.2.3.2.6	Coprodutos.....	68
4.2.4	Projeções do Mercado Brasileiro.....	70
5.	APLICAÇÃO DO A3 NA ETAPA DE FERMENTAÇÃO.....	73
5.1	PROPOSTA DE MELHORIA	74
5.2	INVESTIGAÇÃO	74
5.2.1	Processo de Recebimento e Estocagem.....	74
5.2.2	Processo de moagem.....	74
5.2.3	Gelatinização (Pré-Hidrólise).....	75
5.2.4	Liquefação	75
5.2.5	Sacarificação/ Fermentação	75
5.3	META.....	75
5.4	ANÁLISE DE CAUSA RAIZ	75
5.5	CONTRAMEDIDAS.....	77
5.6	EXPERIMENTAÇÃO.....	77
5.7	IMPLEMENTAÇÃO/CONTRAMEDIDAS.....	80
5.8	<i>FOLLOW UP</i>	81
5.9	<i>INSIGHTS E SHARINGS</i>	81
6.	CONCLUSÃO.....	84
7.	REFERÊNCIAS.....	85

1. INTRODUÇÃO

Com a internacionalização da economia, acompanhada pelo avanço tecnológico, a concorrência acentuada e o crescimento da demanda dos consumidores, torna-se cada vez mais crucial que as corporações aprimorem a eficiência de seus sistemas produtivos, reduzam custos e utilizem melhor seus recursos, aumentando assim sua eficácia produtiva (RANGEL et al., 2012).

Para manterem-se competitivas no mercado, as empresas precisam gerenciar continuamente seus processos produtivos em busca de maior eficiência, eliminação de falhas e desperdícios e assegurando a disponibilidade dos equipamentos produtivos (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Freqüentemente, a eficácia da produção é confundida com a produtividade, visto que a produtividade é um indicador da eficácia de um sistema produtivo; portanto, se um sistema apresentar maior produtividade, também será mais eficiente (MARIANO, 2007). A produtividade é um termo abrangente para indicadores que avaliam a saída de recursos utilizados na produção, ou seja, a relação entre a quantidade produzida e a quantidade de insumos ou elementos empregados no processo produtivo (SCHETTINI, 2010).

Desde a revolução industrial, a eficácia produtiva é um atributo apreciado pela sociedade, mas nas últimas décadas, em decorrência do processo de globalização, que promoveu a abertura de mercados entre países e elevou a competitividade entre as empresas, a eficácia produtiva tornou-se cada vez mais significativa (MARIANO, 2007). Contudo, são empregados métodos para avaliar a eficácia de máquinas e equipamentos e identificar suas perdas e rendimentos nos processos (RODRIGUES; FERRARIN; OLESKO, 2013).

As usinas sucroenergéticas, em geral, são companhias dedicadas à produção de açúcar e etanol advindos da cana-de-açúcar e milho, além de outros produtos (SILALERTRUKSA; PONGPAT; GHEEWALA, 2017; SCHEITERLE et. al., 2018). O setor sucroenergético é considerado um dos mais atrativos para investidores dentre as agroindústrias, tendo apresentado um crescimento significativo nas últimas décadas (BIRRU et al., 2016). O Brasil se destaca globalmente por ser um país que oferece vantagens em seu território, como: dimensão, condições climáticas e técnicas de cultivo bem desenvolvidas (NOGUEIRA; GARCIA, 2013).

O interesse do governo brasileiro pelo etanol teve início em 1933 com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool e a implementação de uma legislação permitindo misturas de etanol na gasolina de até 40%; nesse período, a indústria sucroalcooleira brasileira era incentivada a produzir o máximo de etanol possível (NASS; PEREIRA; ELLIS, 2007).

Entretanto, o interesse do Brasil pela produção de álcool combustível cresceu durante a década de 70 com a fundação do Programa Nacional do Alcool – PRÓALCOOL (FERREIRA et. al., 2014). A partir desse programa, observou-se um aumento da produção agrícola, modernização e ampliação das usinas já existentes, promovendo, assim, uma grande expansão da atividade sucroalcooleira no Brasil (NASS; PEREIRA; ELLIS, 2007).

A fabricação de etanol no Brasil tem sido desenvolvida desde o início do século XX e, atualmente, apresenta uma produção em larga escala exercendo um papel fundamental na economia nacional. O país é o segundo maior produtor global de álcool combustível, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, sendo São Paulo o estado que se destaca nesse ranking, com 56% de toda a cana-de-açúcar cultivada no território brasileiro (IEA – INFORMAÇÕES ESTATÍSTICAS DA AGRICULTURA, 2013).

Aproximadamente 45 % da energia e 18 % dos combustíveis consumidos no Brasil já são de fontes renováveis. No restante do mundo, 86% da energia provém de fontes não renováveis. Reconhecido como pioneiro global no uso de biocombustíveis, o Brasil conquistou uma posição almejada por diversas nações que buscam desenvolver fontes alternativas de energia renovável como estratégias em substituição ao petróleo (ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL, 2017). Dessa maneira, as empresas frequentemente buscam meios para se manterem competitivas e, para que isso aconteça, é imprescindível a implementação de práticas que contribuam para o aumento de sua eficiência e eficácia, visando atender o crescente mercado consumidor (JÚNIOR; OLIVEIRA, 2016).

A modernização é considerada como a busca por capacitação para lidar com as novas realidades estabelecidas. Conforme Miguel (2006), as ferramentas de qualidade são frequentemente empregadas como suporte à tomada de decisões para o desenvolvimento da qualidade ou assistência na resolução de diversos problemas.

Mata-Lima (2007) afirma que as ferramentas de gestão da qualidade podem ser eficazes para a identificação de problemas e auxiliar na criação de planos de ação para a proposição de soluções.

A melhoria contínua pode ser definida como uma ação persistente e tem se mostrado uma das maneiras mais eficazes de elevar a posição competitiva de uma organização (OLIVEIRA; MIRALES, 2022). Nesse contexto, o conceito de melhoria contínua está associado à capacidade das organizações de reduzirem de maneira sistemática, gradual e eficiente, a distância que as separa do que desejam ou do que esperam se tornar (CARVALHO; SOUSA, 2021). Isso é alcançado através da habilidade de solucionar problemas por meio de pequenos passos, repetições constantes e etapas discretas de transformação (OLIVEIRA; MIRALES, 2022). A transformação ocorre através daquilo que é praticado repetidamente. Assim, a perfeição não é uma prática isolada, pois se configura como um hábito (CARVALHO; SOUSA, 2021). Portanto, é essencial que a melhoria contínua, para se tornar duradoura, seja direcionada e analisada por meio do planejamento estratégico a longo prazo (RAMIREZ, et. al., 2022). Este método visa colocar a organização em uma posição superior no mercado, especialmente quando é necessário estabelecer procedimentos para impulsionar projetos baseados em ações de longo prazo, em benefício do futuro organizacional (FERREIRA; DIAS, 2019).

As indústrias e os setores de serviços estão implementando programas de qualidade que se fundamentam em ferramentas e técnicas visando aprimorar o desempenho operacional, reduzir os custos de produção e aumentar a produtividade (WERKEMA, 1995; LEVINE, 2000). Segundo Toledo (2001), as empresas devem perseguir a qualidade por meio de um conjunto de atividades que definam parâmetros e padrões de seus produtos. Esse objetivo abrange desde a aplicação de um conjunto de técnicas até o consumo final do produto. Entre as principais técnicas ou ferramentas, podem-se mencionar o fluxograma, A3, VSM, PDCA, 5W2H, brainstorming e Ishikawa, as quais possuem características individuais que, quando utilizadas em conjunto, se complementam. Nesse contexto, investir no planejamento e nas decisões das estratégias a serem aplicadas para a minimização ou eliminação dos agentes de perdas é essencial. Tal ação só é viável através de uma melhor compreensão das atividades e seus efeitos no fluxo de produção (LIMA, 2014).

Os fundamentos e práticas das organizações *Lean*, ou produção enxuta, são reconhecidos globalmente como a forma mais eficaz de instaurar e manter a melhoria contínua das empresas (BERTI, 2010). As metas precisam ser divulgadas em todos os níveis da organização e servir como um eficaz guia de orientação para o trabalho. Além disso, é crucial a habilidade de influenciar a definição das metas (HOLTSKOG, 2013).

A origem do *Lean* ocorreu no Japão, na década de 1950, na Toyota: o Sistema Toyota de Produção foi fundamentado na aspiração de produzir em um fluxo contínuo, que não dependia de longos períodos de produção para ser eficiente, baseado na percepção de que apenas uma pequena fração do tempo e do esforço total é capaz de proporcionar valor agregado (no produto ou serviço) para o cliente final (MELTON, 2005).

A competitividade ultrapassa as fronteiras regionais e cria um vasto mercado interconectado, onde otimizar a eficiência do processo é essencial para a sobrevivência de uma indústria. Por isso, a aplicação de “metodologias” ou “filosofias” é de suma importância, uma vez que acrescentam valor ao sistema produtivo e ajudam na minimização dos desperdícios. Há, na literatura, uma evidência significativa de que o *Lean* é muito mais do que um conjunto de ferramentas, sendo, na verdade, uma filosofia. Contudo, no que tange aos elementos do *Lean*, não há um consenso inequívoco sobre o conjunto de práticas e ferramentas que o compõem (PACHECO, 2014).

O *Lean* é uma ferramenta de aprimoramento da qualidade que pode diminuir os atrasos entre as etapas do processo, evidenciando o “rastros” de causas evidentes; e para que os problemas de qualidade não se tornem desordenados e confusos (NICHOLAS, 2018). O *Lean* pode ser aplicado a todos os aspectos da Cadeia de Suprimentos, trazendo grandes benefícios para uma organização de maneira sustentável. Ao implementar o *Lean*, os dois principais limitadores da aplicação são: i) a ausência da percepção de benefícios tangíveis, e ii) a visão equivocada de que muitos processos já são eficientes (MELTON, 2005).

O maior desafio das indústrias de manufatura tem sido aumentar a produtividade com menos recursos, e assim manter a competitividade no mercado. Por isso, implementar o *Lean* é uma maneira de buscar esse objetivo. A manufatura enxuta consiste em um conjunto de princípios e ferramentas de gestão de produção

que visa a melhoria contínua por meio da redução de desperdícios. Mesmo assim, utilizar ferramentas padronizadas copiadas diretamente da literatura Lean não é garantia de sucesso. A motivação para promover a melhoria contínua é construída em metas amplamente compreendidas e liderança engajada (HOLTSKOG, 2013).

Atualmente, centenas de empresas de manufatura adotam princípios de manufatura enxuta com o intuito de reduzir desperdícios e aumentar a produtividade das operações de manufatura de maneira geral. Segundo a CNI (2019), as tecnologias digitais, ao serem implementadas de maneira abrangente nas operações industriais, geram vantagens como incremento da eficiência operacional e diminuição de despesas, adaptação das linhas de produção, aprimoramento da qualidade do produto, redução dos tempos de lançamento de produtos, além do desenvolvimento de produtos, serviços digitais e modelos de negócios.

Diante do exposto, este trabalho analisa o processo de fermentação de uma biorefinaria com a matéria prima sendo o milho, com o intuito de examinar esta etapa de fabricação de etanol de milho por meio do uso de ferramentas da qualidade, além de sugerir alternativas estratégicas que reduzam ou erradiquem as perdas reconhecidas.

2. OBJETIVO

Realizar uma análise através da aplicação de uma ferramenta de *Lean Manufacturing* do processo de fermentação na produção de etanol de milho.

A ferramenta escolhida para utilização é o Método A3.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o processo de fermentação de uma usina de etanol;
- Caracterizar os fatores que influenciam no processo de fermentação de uma usina de etanol;
- Elaborar uma proposta de melhoria do processo de fermentação de uma usina de etanol.

2.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil se destaca como um dos pioneiros na fabricação de bioetanol e, atualmente, ocupa a segunda posição como maior produtor, responsável por 31% da produção global, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, que detêm 53% em 2020 (RFA, 2021). A produção brasileira de bioetanol é predominantemente originada do suco da cana-de-açúcar, enquanto nos Estados Unidos e em outras nações, o milho é a principal matéria-prima utilizada (INGLEDEW et al. 2009).

Nas usinas, no caso da cana-de-açúcar pode ser direcionada a dois produtos: açúcar e/ou etanol, ambos passando pelas mesmas etapas iniciais de produção, que incluem: recepção e limpeza da cana; extração do suco por meio da moagem; tratamento/evaporação e purificação do suco; peneiramento e clarificação (RODRIGUES et. al., 2014).

O etanol brasileiro é considerado extremamente competitivo em relação aos combustíveis fósseis e a biocombustíveis provenientes de outras fontes, devido ao seu menor custo de produção, bom balanço energético, baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE) e alta produtividade. Aproximadamente 80% das emissões de GEE são evitadas com a substituição da gasolina pelo etanol de cana-de-açúcar, enquanto reduções de emissão de 34% e 35% são alcançadas com a substituição do etanol de trigo e milho, respectivamente (WANG et. al., 2012).

Nesse cenário, é fundamental a abordagem de melhoria no processo de uma usina de produção de etanol de milho, especialmente ao que se refere ao processo de fermentação, que por se tratar de uma etapa biológica, apresenta grande variação de processo e conseqüente impacto às demais etapas do processo.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o referencial teórico sobre o *Lean Manufacturing*, abordando suas origens, princípios, estrutura, ferramentas, principais práticas e uma revisão da literatura na busca por práticas fundamentais para a implementação desta filosofia em ambientes organizacionais.

3.1 LEAN MANUFACTURING

O *Lean Manufacturing* – também definido como Sistema de Produção Enxuta ou Sistema Toyota de Produção (STP) – é a filosofia japonesa de gerenciamento que tem por objetivo principal a eliminação de desperdícios e, por consequência, minimização de custos e aumento na qualidade do produto final (WOMACK; JONES; ROOS, 1992). Para Ohno (1996), idealizador do pensamento, um fluxo enxuto é aquele onde o tempo entre a emissão do pedido e a entrega do produto final, nas condições especificadas pelo cliente, é mínimo.

Por sua vez, Lucas (2019) descreve os objetivos fundamentais do Lean como sendo com a Integração e otimização do sistema de manufatura, qualidade, flexibilidade no processo produtivo para produzir somente o que for demandado pelo cliente, e compromisso com clientes e fornecedores e redução de custos de produção. Ou seja, o STP busca a redução de perdas e de processos ou atividades que não agregam valor ao cliente (SOUZA; THOMAZ, 2019).

3.1.1 Antecedentes Históricos

Quando questionado o desenvolvimento da revolução industrial, a importância das inovações tecnológicas como parte central desse fato histórico é quase sempre privilegiada. É certo que a combinação de demandas fabris e melhorias no conhecimento laboratorial foram fundamentais para que se enxergasse a possibilidade desse novo ritmo de produção e consumo de mercadorias, no entanto, o simples conceito de desenvolvimento de uma nova máquina não era suficiente para aumentar a eficiência e melhorar as operações, proporcionando uma ideia mais ampla do processo produtivo na era industrial (HILSDORF et al., 2019).

Nesse contexto, desenvolvido pelo engenheiro norte-americano Frederick Winslow Taylor, surge o Taylorismo – com início por volta do final do século XIX e início do século XX – onde o processo organizacional passa a ser visto como a soma de todas as operações executadas (AZEVEDO, 2014). Segundo Ribeiro (2015), Taylor propõe uma gerência científica de trabalho por meio de métodos de experimentação, regras e maneiras de se executar o trabalho que padronizam a execução de operações através da relação entre tempo e movimento. Para Taylor, “[...] um tipo de

homem é necessário para planejar e outro tipo diferente para executar o trabalho” (TAYLOR, 1987, p. 35). Ou seja, ele acreditava que a divisão do trabalho deveria ser hierarquizada.

Contrapondo o modelo de Taylor e para sistematizar a produção em massa, em 1914 Henry Ford desenvolveu uma nova sistemática de produção industrial, o Fordismo.

Ford incorporou a esteira rolante que ditava o ritmo de produção, alcançando ganhos expressivos de produtividade (RIBEIRO, 2015). O objetivo, além do ganho em produtividade, era a “economia de pensamento” e a execução mínima de movimento do operário que, sendo possível, deveria fazer sempre a mesma atividade com um só movimento (FORD, 1964, p. 65).

Entre 1947 e 1975, durante sua reconstrução pós Segunda Guerra Mundial e com uma economia carente de capital (HILSDORF et al., 2019), surge no Japão – idealizado por Eiji Toyoda e Taiichi Ohno da Toyota (AZEVEDO, 2014) – o conceito de Produção Enxuta.

Segundo Azevedo (2014), a diferença no tamanho dos mercados americano e japonês tornava inviável a implementação dos modelos de produção desenvolvidos e aplicados nos Estados Unidos. Além disso, após o Japão ser devastado pela Segunda Guerra, muitas indústrias e centros de abastecimentos já não existiam mais, a população não tinha dinheiro e a demanda do mercado não justificava uma produção em massa (AZEVEDO, 2014).

Assim surge a necessidade de um novo modelo de gerenciamento industrial (HILSDORF et al., 2019). Toyoda e Ohno criam o então chamado Sistema de Produção Toyota, que futuramente passa a ser Produção Enxuta ou *Lean Manufacturing* (WOMACK; JONES; ROOS, 1992).

No que diz respeito aos princípios desse novo método gerencial, Womack e Jones (2004) conceituam o “Pensamento Enxuto” (*Lean Thinking*) em cinco princípios, apresentados a seguir.

3.1.2 Princípios do *Lean Manufacturing*

Para que uma produção seja enxuta e siga a filosofia do Sistema Toyota de Produção, é necessário que o produto flua, de forma contínua, através dos processos que agreguem valor.

Segundo Shingo (1996), o STP “é um sistema que visa a eliminação total de perdas”. Além disso, o Sistema de Produção Enxuta pode ser entendido como um processo de cinco passos, sendo eles: definir o valor do cliente, definir o fluxo de valor, fazê-lo “fluir” ao invés de “puxar” a partir do cliente e buscar a excelência operacional (WOMACK e JONES, 2004). Conforme Hilsdorf et al. (2019), os cinco princípios do *Lean* são: especificação de valor, identificação do fluxo de valor, fluxo contínuo, produção puxada e busca pela perfeição; eles podem ser descritos da seguinte forma:

Especificação de valor, em que é necessário que o produto tenha requisitos que atendam às necessidades do cliente, como qualidade, tempo e quantidade desejada, além do valor do produto que não deve ser definido pela empresa e sim pelo cliente.

Identificar o fluxo do valor, que significa analisar detalhadamente a cadeia produtiva e separar os processos em três categorias, sendo elas, processos que de fato agregam valor, processos que não agregam valor e, portanto, devem ser extintos, e os processos que não agregam valor, mas são essenciais.

Fazer o valor fluir continuamente, ou seja, fluxo contínuo, está relacionado com a eliminação dos desperdícios e etapas do processo que não agregam valor, como a redução dos tempos de processamento de pedidos, de concepção de produtos e de estoques, permitindo um fluxo contínuo dos processos que criam valor ao produto.

Produção puxada consiste na produção sob demanda, ou seja, produzir aquilo que é necessário, somente quando necessário, reduzindo os estoques ao máximo. E por fim, o princípio que deve ser o objetivo de todos dentro da empresa envolvidos nos processos que agregam valor, a busca pela perfeição, que se baseia em um processo contínuo de melhorias visando tornar os processos, pessoas e produtos cada vez mais eficientes e eficazes.

Já os processos que não agregam valor ao produto, são desnecessários e geram desperdícios que devem ser eliminados.

3.1.3 Os Oito Desperdícios *Lean*

O Sistema Toyota de Produção é uma metodologia que busca a eliminação total dos desperdícios, dessa forma, na produção, desperdício se refere a todos os elementos e atividades que não agregam valor e tendem a aumentar os custos, como, por exemplo, excesso de pessoas, de estoques e de equipamentos (OHNO, 1997).

Os oito desperdícios são: superprodução, defeitos e retrabalhos, super processamento, excesso de estoque, movimentos desnecessários, transporte, espera e desperdício intelectual.

Segundo Lima e Campos (2014), a superprodução é a perda mais danosa, pois tende a esconder as demais, dessa forma, conforme os princípios do sistema Toyota, produzir mais do que é necessário é a maior das fontes de desperdício. Oliveira (2016) descreve os dois tipos de superprodução, sendo elas, a superprodução quantitativa, ou seja, produzir além do que realmente é necessário, provocando sobra de produtos e formação de estoque, e a superprodução antecipada, que está relacionada com a produção antes da real necessidade.

Os defeitos estão relacionados aos produtos, atividades ou serviços que não são executados de forma esperada ou então no mínimo necessário para atender as especificações do cliente (SANTOS, 2021). O autor também cita que, conforme os princípios do *Lean* é necessário fazer “certo” na “primeira vez”, buscando sempre evitar possíveis defeitos e retrabalhos.

O desperdício de super processamento, de acordo com Oliveira (2016), é referente a atividades que não agregam valor para o cliente. O processamento inadequado faz referência a um conjunto de etapas do processo que podem ser consideradas desnecessárias e que, caso sejam eliminadas, não haveria impacto no processo (SANTOS, 2021).

A existência de estoques elevados de matérias-primas, material em processo e produtos acabados tem origem no desbalanceamento da relação entre o período de entrega do pedido e o período de produção, dessa forma, as perdas por excesso de estoque geram altos custos financeiros e demandam espaço físico adicional (OLIVEIRA, 2016).

Os movimentos desnecessários são bem semelhantes ao transporte excessivo, ou seja, a movimentação considera o deslocamento das pessoas, dos materiais e insumos desnecessários dentro do processo, dessa forma, layouts mal desenhados e uma má distribuição das estações de trabalho requerem uma maior movimentação das pessoas, geralmente desnecessárias (SANTOS, 2021).

As perdas associadas ao transporte são referentes a todas as atividades de movimentação de materiais desnecessárias, ou seja, que não agregam valor e geram custos, porém mesmo não agregando valor, o transporte acaba sendo considerada

uma atividade necessária tendo em vista os longos caminhos que são percorridos pelo material ao longo do seu processamento, isso ocorre devido às restrições do processo e das instalações (OLIVEIRA, 2016).

Segundo Ribeiro (2018), o desperdício em relação a espera ocorre quando produtos não estão sendo movimentados ou trabalhados. A espera é facilmente concluída como um desperdício de tempo, pois pode fazer com que produções sejam paradas, funcionários fiquem ociosos ou pedidos sejam entregues com atraso, e até mesmo atingir uma combinação de consequências como essas (GRABAN, 2013).

Difundido nos anos 2000 e incorporado à metodologia *Lean*, o desperdício intelectual consiste no não aproveitamento de talentos dentro da indústria (RODRIGUES, 2018), esse tipo de desperdício é representado pela subestimação do potencial intelectual, das sugestões de melhoria vindas de funcionários e pelo não reconhecimento da experiência nas funções (OLIVEIRA; AFFONSO, 2017). De acordo com Rodrigues (2018), esse desperdício tende a gerar impactos negativos na empresa e deixar de agregar valor para o cliente, pois é capaz de atingir não apenas as etapas do processo produtivo em que está envolvido como também todos os colaboradores e, ainda, impactar no relacionamento com o cliente.

3.1.4 Estrutura do Sistema Toyota de Produção (*Casa Lean*)

O STP é representado por um diagrama conhecido como “casa” do Sistema Toyota de Produção, conforme mostra a Figura 1. No telhado, estão os objetivos do STP focados no cliente final, que está ligado a maior qualidade possível, menor custo e o *lead time* mais curto (ARAUJO, 2021).

FIGURA 1 - Casa Toyota de Produção



Fonte: Villar (2018) *apud*. Santos (2014).

De acordo com Oliveira (2019), a base de todo Sistema Toyota de Produção é a estabilidade dos seus pilares (*Just in Time* e *Jidoka*), que nada mais é que uma estrutura sob controle e com previsão garantida para obter uma produção de itens tendendo ao zero defeito, na quantidade máxima e nos momentos mais apropriados.

O primeiro pilar de sustentação é representado pelo método *Just in Time*, que proporciona uma produção no custo efetivo e entrega apenas as peças necessárias com qualidade, na quantidade certa, no tempo e lugar certo, usando o mínimo de equipamentos, materiais, instalações e mão de obra (MOURA, 1989).

O segundo pilar é representado pelo método *Jidoka*, que se baseia na automação com a inteligência e um toque humano, não permitindo a passagem de um defeito para a próxima etapa do processo (ARAUJO, 2021). De acordo com Oliveira (2019), alguns dispositivos a prova de falha são utilizados para detectar defeitos na execução das operações, conhecidos como *pokayoke*.

Os pilares *Just in Time* e *Jidoka* tem em sua base a sustentação por parte do trabalho padronizado, melhoria contínua (*Kaizen*) e nivelamento da produção (*Heijunka*), dessa forma, a padronização busca desenvolver o aumento da produtividade e para isso busca identificar fatores que possam ser trabalhados para reduzir ou eliminar as perdas encontradas (OLIVEIRA, 2019).

A melhoria contínua, através do uso do *Kaizen*, proporciona a estabilidade e o controle do processo, permitindo a produção de itens de qualidade e sem defeitos (VILLAR, 2018). E o *Heijunka*, de acordo com Oliveira (2019), realiza o nivelamento das quantidades e mix de produtos a serem produzidos, permitindo a produção de diferentes itens e garantindo o fluxo da produção.

Portanto, para que se atinja a estabilidade e alcance os pilares para desenvolver as práticas do STP, além dos princípios já abordados neste trabalho, são necessárias algumas práticas, envolvendo técnicas e ferramentas (QUEIROZ, 2015).

3.1.5 Lean Manufacturing E Indústria 4.0

Com o progresso das tecnologias informacionais, os procedimentos produtivos têm modificado a indústria convencional, alterando sua maneira de refletir, gerenciar e fabricar, levando a um novo nível em termos de evolução (TEIXEIRA, et al., 2019).

A implementação dos princípios de Lean Manufacturing representa um significativo desafio para as corporações e as soluções oferecidas pela Indústria 4.0 podem apoiar na perspectiva de integração. Da mesma forma, setores que incorporam o Lean Manufacturing como parte de suas culturas estão mais preparadas para aproveitar os benefícios das tecnologias da Indústria 4.0 (IKEZIRI, et al., 2020).

A Figura 2 correlaciona as ferramentas Lean com as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0.

FIGURA 2 - Correlação entre Ferramentas Lean e Tecnologias da Indústria 4.0

Lean	Indústria 4.0	Big Data	Computação em nuvem	Ciber-segurança	Internet das coisas	Manufatura aditiva	Realidade aumentada	Robôs autônomos	Simulação	Integração de sistemas
Redução de desperdícios	⊕	●	○	⊕	⊕	○	●	⊕	●	
Feedback do fornecedor	⊕	⊕	⊕	●	○	○	○	○	●	
Just in Time (JIT)	●	○	○	●	●	○	⊕	●	●	
Participação do cliente	○	○	●	⊕	●	●	○	●	●	
Demanda puxada	●	○	○	⊕	●	○	⊕	○	●	
Fluxo contínuo	○	⊕	○	●	⊕	○	●	●	●	
Troca Rápida de Ferramentas	○	○	○	○	●	⊕	●	⊕	○	
CEP	●	●	○	●	●	○	○	○	○	
TPM	○	○	○	⊕	○	●	●	○	○	
Participação do colaborador	○	⊕	●	⊕	○	●	○	⊕	●	

Legenda: ○ baixo impacto, ⊕ médio impacto, ● alto impacto

Fonte: IKEZIRI, et al. (2020)

As tecnologias digitais constituem os fundamentos para a transformação da Indústria 4.0. Essas tecnologias podem ser utilizadas de diversas maneiras conforme

o projeto da organização, gerando soluções específicas para a resolução de desafios (TEIXEIRA, et al., 2019).

Os dois temas mencionados, Indústria 4.0 e Filosofia Lean, se complementam, uma vez que a Indústria 4.0 oferece as tecnologias habilitadoras e todo o dinamismo necessário para as organizações contemporâneas (STEFANI, et. al., 2021).

3.1.6 Ferramentas do Lean Manufacturing

O *Lean Manufacturing* dispõe de um conjunto de técnicas e ferramentas que tem o objetivo de potencializar o processo produtivo através da redução de atividades que não agregam valor (RODRIGUES; KIELING, 2020). Dessa forma, de acordo com Riana (2006), quando aplicada, as ferramentas são instrumentos utilizados para implementação de um Sistema de Manufatura Enxuta, que ditam “como” seguir seus princípios.

A partir do uso das ferramentas *Lean* é possível organizar e definir as melhores ações para obter bons resultados na produção, reduzindo desperdícios (NUNES, 2019) e promovendo a cultura de melhoria contínua (OLIVEIRA et al., 2021). Algumas ferramentas consideradas fundamentais e que serão abordadas no presente trabalho são descritas abaixo.

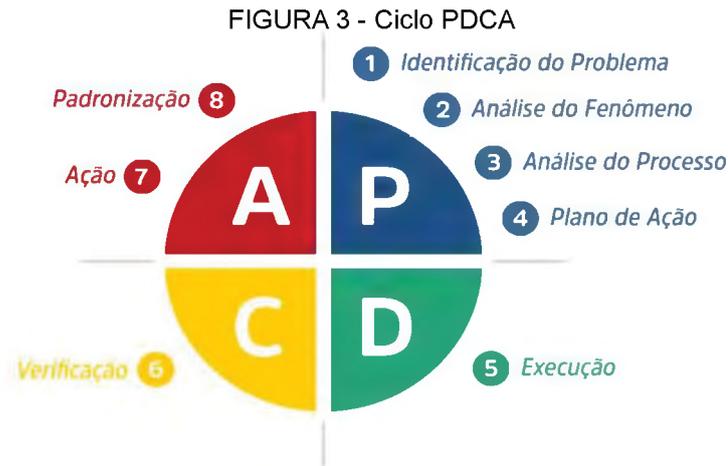
3.1.6.1 Ciclo PDCA

O Ciclo PDCA, igualmente denominado ciclo de Shewhart ou de Deming, emergiu na década de 1920 como um instrumento de gestão da qualidade que, quando aplicado de forma contínua, assegura elevado nível de desempenho em um processo de trabalho (ARRUDA, 1997). O PDCA é considerado um ciclo eficiente para solução de problemas (SHIBA; GRAHAM; WALDEN, 1997), sendo uma ferramenta gerencial capaz de fomentar a produtividade, reduzindo as perdas e garantindo um sistema de produção mais enxuto (SLACK, 2018).

Atualmente, esse instrumento tem contribuído para uma melhoria na gestão e está presente em diversas organizações de diferentes dimensões, sejam elas de bens ou serviços (SILVA, et. al., 2019). Assim, quando reiterado várias vezes e de forma

dinâmica, o ciclo proporciona vantagens competitivas ao empreendimento, tornando a qualidade e a excelência pontos estratégicos da organização (GASPAROTTO, 2019).

Para a aplicação da ferramenta, é necessário percorrer as quatro etapas do ciclo (DEMING, 1990): *Plan* (planejar), *Do* (executar), *Check* (verificar) e *Action* (agir). O ciclo PDCA é apresentado na Figura 3.



Fonte: Peters, 1998.

A primeira fase no processo de implementação do ciclo é a de planejamento (*Plan*), ela é responsável por “desenhar” o processo em que o ciclo será aplicado (GASPAROTTO; GOMES FILHO, 2019). É nessa etapa que devem ser identificados os problemas e oportunidades possibilitando levantar dados e informações e, assim, planejar o escopo de correção. Segundo Deming (1990), as metas devem ser determinadas juntamente com um plano de ação para o alcance delas.

Na fase seguinte, executar (*Do*), com as metas determinadas e o plano de ação definido, é preciso treinar os envolvidos (DEMING, 1990) para executar tudo o que foi planejado na fase anterior (SILVA et al., 2019).

Em seguida, é preciso verificar (*Check*) constantemente se os dados obtidos estão alinhados mediante a meta planejada (DEMING, 1990). Silva et al. (2019) afirma que sem mensurações não é possível haver gestão.

Já a fase final do PDCA consiste em agir (*Action*) disseminando na organização a estratégia que deu certo (DEMING, 1990) e aplicando ações corretivas naquelas que não tiveram o resultado esperado (SILVA et al., 2019).

3.1.6.2 Procedimento Operacional Padrão

Segundo Corrêa et al. (2019), o Procedimento Operacional Padrão (POP) é um documento que contém uma descrição bem detalhada de um processo, ou seja, tem objetivo orientativo através de uma sequência detalhada das atividades desenvolvidas, garantindo uma padronização com resultados esperados (VIEIRA, 2014). O POP apresenta uma estrutura mínima, composta por definição, objetivo, material utilizado, procedimento técnico, recomendações, responsabilidade e referências (ROCHA, 2012).

De acordo com Ribeiro et al. (2017), o POP deve conter uma descrição detalhada dos procedimentos a serem seguidos e as condições de fabricação e operação, deve constar todos os equipamentos, materiais e componentes que serão utilizados na tarefa em questão, incluindo os instrumentos de medida e os padrões de qualidade definidos, além de comentários pertinentes ao procedimento como anomalias e atividades críticas, e quando necessário informações com relação a registro de inspeção dos equipamentos.

3.1.6.3 Programa 5S

Os 5 Sensos, ou simplesmente 5S, são um conjunto de conceitos simples que, quando corretamente aplicados, modificam o ambiente de trabalho, impactando desde as atividades de rotina, até alterações nas percepções humanas e alterações de humor (LAPA, 1998). Descrita como uma técnica para a melhoria contínua do gerenciamento de processos (FALKOWSKI; KITOWSKI, 2013), a ferramenta 5S foi desenvolvida visando minimizar custos e desperdícios, melhorar a qualidade de vida dos trabalhadores e aumentar a produtividade organizacional (BARBOSA et al., 2021).

As tarefas presentes no 5S são representadas por palavras japonesas iniciadas pela letra "S", quando traduzidas para o português, são acrescidas pela palavra *senso*. Pizzi (2020) define os *sensos* como:

- *Seiri* (*senso de utilização*): manter na área de trabalho o que realmente é utilizado, o que for desnecessário deve ser descartado;
- *Seiton* (*senso de organização*): designar um local adequado para cada material utilizado e sempre mantê-lo nesse lugar;

- Seiso (senso de limpeza): manter o local de trabalho limpo e ter o hábito de sujar o mínimo possível durante o desenvolvimento das tarefas;
- Seiketsu (senso de padronização): aumentar o nível de qualidade dos processos de trabalho, propiciando saúde física, mental e emocional aos colaboradores;
- Shitsuke (senso de autodisciplina): indispensável e próprio a cada colaborador para que os outros sentidos sejam eficazes.

De maneira geral, o programa 5S enfatiza aspectos básicos da rotina empresarial, como, por exemplo, utilizar a ferramenta adequada, transmitir a informação correta, utilizar o lugar designado e ter pontualidade no desempenho das tarefas, detalhes que quando negligenciados podem ocasionar grandes transtornos (POSSARLE, 2014).

3.1.6.4 *Lean Leadership*

De acordo com Berlanga, Husby, Anderson (2018), o *Lean Leadership* – também conhecido como liderança enxuta – “é visto como a base, que determina o sucesso de uma iniciativa *Lean*”. O processo de transformação ou a lógica para a implantação do *Lean* é relativamente simples, no entanto, o sucesso dessa implementação depende da atitude das pessoas envolvidas, dessa forma, a implantação do *Lean Manufacturing* demanda um novo perfil de liderança (LEITE, 2017).

O *Lean* é geralmente associado apenas as ferramentas que são usadas para criar eficiência e padronizar processos, porém, segundo Mann (2009), a implementação dessas ferramentas representa no máximo 20% do esforço nas transformações *Lean*, os outros 80% são gastos com mudança de práticas e comportamentos dos líderes e, em última análise, em sua mentalidade, dessa forma, a alta administração desempenha um papel essencial no estabelecimento de condições que permitam que esse esforço seja bem-sucedido.

Segundo Pellegrino (2016), dentre as tarefas fundamentais do líder *Lean*, destaca-se ser parte do desenvolvimento e qualificação de pessoas, incluindo os futuros líderes nas metodologias e ferramentas relacionadas à abordagem *Lean* e criar visão e alinhar objetivos (*Hoshin Kanri*).

De acordo com Cuozzo (2018), o *Hoshin Kanri* “é uma forma, através da qual uma empresa pode gerir e dar cumprimento à sua estratégia”. A palavra *Hoshin* se refere a declaração de uma diretriz estratégica e a palavra *Kanri* faz referência a um sistema para gerenciar e controlar o processo de desdobramento, dessa forma, a palavra *Hoshin Kanri* traduzida para o português significa desdobramento de diretrizes (PELLEGRINO, 2016).

Nesse sentido, o *Hoshin Kanri* representa uma técnica para decidir a visão e desdobrá-la em objetivos menores, que sejam mais fáceis de compreender e atingir (CUOZZO, 2018).

Seu processo de planejamento é tradicionalmente descrito como uma cascata de metas de cima para baixo, dando início com as metas da alta administração e passando para o nível mais baixo da organização (THÜRER et al., 2019).

3.1.6.5 *Kaizen*

Segundo Oliveira et al. (2021), o *Kaizen* é uma ferramenta desenvolvida por Masaaki Imai, no Japão, na segunda metade do século XX e que atualmente é conhecida e praticada em todo o mundo como um método de melhoria contínua. Seu objetivo principal é a melhoria dos processos padronizados com o intuito de eliminar desperdícios, resolver problemas de fluxo de trabalho e de negócios, sendo necessário o envolvimento de todos os funcionários, desde a alta gerência até os trabalhadores da linha de montagem (TEBALDI, 2019).

As empresas atualmente utilizam esta ferramenta para identificar e eliminar qualquer desperdício existente, com o propósito de aumentar a produtividade, seja em algum processo produtivo, em etapas de projetos, na manutenção de máquinas, na elaboração de novos produtos ou em processos administrativos, tendo em vista a satisfação do cliente interno ou externo (HILSDORF et al., 2019).

De acordo com Bianchet (2019), na aplicação do *Kaizen*, as etapas iniciais se baseiam no conhecimento da atual situação do setor que pretende detalhar os processos que envolvem a área examinada, dessa forma, é possível obter dados com relação à produção (deslocamento, o tempo dos processos, o peso dos produtos e o espaço ocupado pelos estoques), em seguida é feito um mapeamento de cada

processo para se ter uma visão holística dos fluxos de produção e identificar possíveis melhorias analisando a movimentação de materiais e pessoas. Posteriormente, é realizado um *brainstorming*, ou seja, é feito um levantamento de possíveis melhorias, e umas das ferramentas utilizadas como apoio na busca da melhoria contínua de produtos e processos, identificando as causas de seus problemas e implementando soluções é o ciclo de PDCA (BIANCHET, 2019).

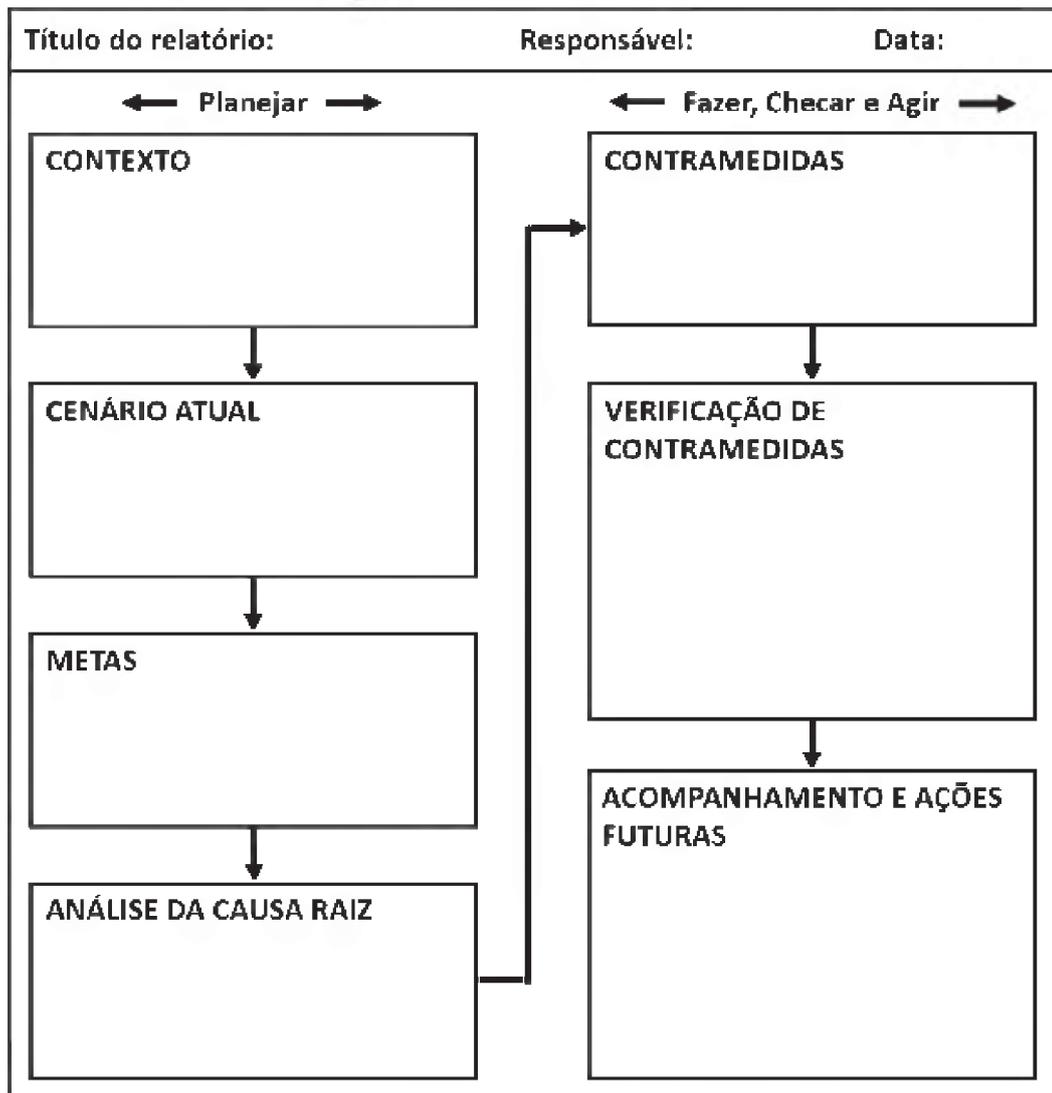
3.1.6.6 Relatório A3

Criado pela Toyota, o relatório A3, ou *A3 Reports*, foi assim nomeado em referência a folha de tamanho A3, pois suas dimensões seriam ideais para concentrar problemas em um único papel (SOBEK; SMALLEY, 2011). Segundo Rocha (2020), a metodologia objetiva, de maneira geral, identificar e encontrar soluções para problemas e monitorar as melhorias aplicadas.

De acordo com Sobek e Jimmerson (2006), o A3 serve como um guia sistemático para solucionar problemas por meio de um processo rigoroso de documentação dos principais obstáculos e pontos de melhoria do processo analisado. Além de auxiliar em análises da organização, apresentar evidências, propor soluções para problemáticas, tornando o desejado em realidade (SHOOK; WOMACK, 2010).

A metodologia de solução de problemas foi reconhecida por sua capacidade de resumir e agrupar problemas, contramedidas, *status*, *follow-up* e planejamento em um só documento (THE LEAN ENTERPRISE INSTITUTE, 2008), além de ter sido fortemente influenciada pelo Ciclo PDCA (SOBEK; SMALLEY, 2011). O relatório pode ser dividido em oito etapas e deve ser preenchido de cima para baixo, da esquerda para a direita (SOBEK; SMALLEY, 2011 e SOBEK; JIMMERSON, 2006), conforme Figura 4.

FIGURA 4 - Modelo de Relatório A3



Fonte: Sobek e Smalley (2011).

Na primeira etapa, é preciso conhecer o cenário atual da organização, indo até o chão de fábrica e dedicando o máximo de tempo possível para entender e analisar o problema de perto (GEMBA), sendo fundamental discutir a ocorrência com os envolvidos para validar informações (SOBEK; SMALLEY, 2011).

Na segunda etapa, é o momento de identificar a causa raiz do problema. Para facilitar o processo, podem ser usadas ferramentas como diagrama de *Ishikawa*, 5 porquês e *brainstorming*, por exemplo (SOBEK; SMALLEY, 2011). Em seguida, na terceira etapa, é preciso analisar a causa raiz para identificar contramedidas e evitar a recorrência do problema, na sequência, os responsáveis devem definir como o projeto irá operar (SOBEK; SMALLEY, 2011).

Na quarta etapa um plano de implementação deve ser desenvolvido colaborativamente para tornar o cenário desejado em realidade, como auxílio a esta etapa pode ser usada a metodologia 5W2H que irá facilitar quem irá fazer o quê, onde, quando, por que e como irão realizar cada ação do plano (SOBEK; SMALLEY, 2011).

Na quinta etapa é realizado o acompanhamento do plano implementado, além de ser definido como e quando o *follow-up* será realizado (SOBEK; SMALLEY, 2011).

A sexta etapa é reservada para reunir os envolvidos, apresentar o progresso do projeto e alinhar novas medidas que poderão ser adotadas (SOBEK; SMALLEY, 2011). Na sétima etapa deve-se revisar o projeto e, na ausência de desvios, enviá-lo para aprovação (SOBEK; SMALLEY, 2011). Por fim, com o projeto aprovado, na etapa oito o plano de ação é colocado em prática e *follow-ups* são realizados para garantir que o problema foi solucionado (SOBEK; SMALLEY, 2011).

3.1.6.7 *Obeya*

Obeya traduzido do japonês significa “sala grande” (NASCIMENTO et al., 2018), é uma ferramenta *Lean* vista como uma forma de planejar a gestão visual em uma sala, tornando mais claro os objetivos de uma organização e mais fáceis as análises de indicadores e o acompanhamento de planos de ações (PISSOLATTI, 2018).

Na sala *Obeya*, a gestão visual aborda dados de produção, projetos e os problemas a serem resolvidos dentro das organizações, além de materiais didáticos referente às boas práticas do *Lean* e dicas de comportamento, dessa forma, é estabelecido um ambiente de colaboração permitindo obter soluções mais rápidas e efetivas (MURAYAMA, 2018). De acordo com Pissolatti (2018), algumas das “ferramentas usadas na sala *Obeya* vão desde gráficos, quadros de progressão de atividades e projetos com a situação atual e metas, informações de qualidade, indicadores de desempenho e informações financeiras”. Para alguns autores, é possível completar os planos de desenvolvimento dessa ferramenta através do ciclo PDCA (CERDA, 2022).

3.1.7 Implementação do Sistema de Produção Enxuta

Até este ponto da pesquisa sobre *Lean Manufacturing* não foram encontrados na literatura um método ou proposta definitiva para sua implementação. Lewis (2000) indica que as razões para isto tendo cada organização tem suas particularidades, logo, há a necessidade de adequação da filosofia para cada contexto organizacional.

Porém, a implementação da filosofia e princípios do *Lean Manufacturing* pode ser descrita como um processo envolvendo um conjunto de ações que requer o planejamento da mudança e o estabelecimento de um ambiente positivo, preparação, implementação de diversas ferramentas e técnicas e medição do progresso alcançado por meio de métricas de desempenho específicas (VIENAZINDIENE; CIARNIENE, 2013).

Dessa forma, Mostafa, Dumrak e Soltan (2013) propõem uma nova estrutura de implementação de 22 elementos construída em quatro fases, sendo elas, fase conceitual, projeto de implementação, implementação e avaliação e a fase de transformação *Lean* completa, conforme mostra a Figura 4. O processo de monitoramento e controle é integrado a todas as fases para garantir que os resultados esperados para a transformação enxuta sejam totalmente entregues. Em seguida, são descritas cada uma das fases com algumas das possíveis ferramentas a serem utilizadas propostas pelos autores.

Na primeira fase, “Fase de conceituação”, o escopo é definido e o pessoal envolvido passa por um treinamento com o objetivo de compreender a filosofia e as ferramentas que servirão de apoio à implementação. Na maioria das organizações, a equipe é nova no conceito *Lean*, conseqüentemente seus membros podem levar um tempo considerável para entender completamente a metodologia, dessa forma, para a eficácia da implementação pode ser necessário contar com ajuda adicional de especialistas *Lean*.

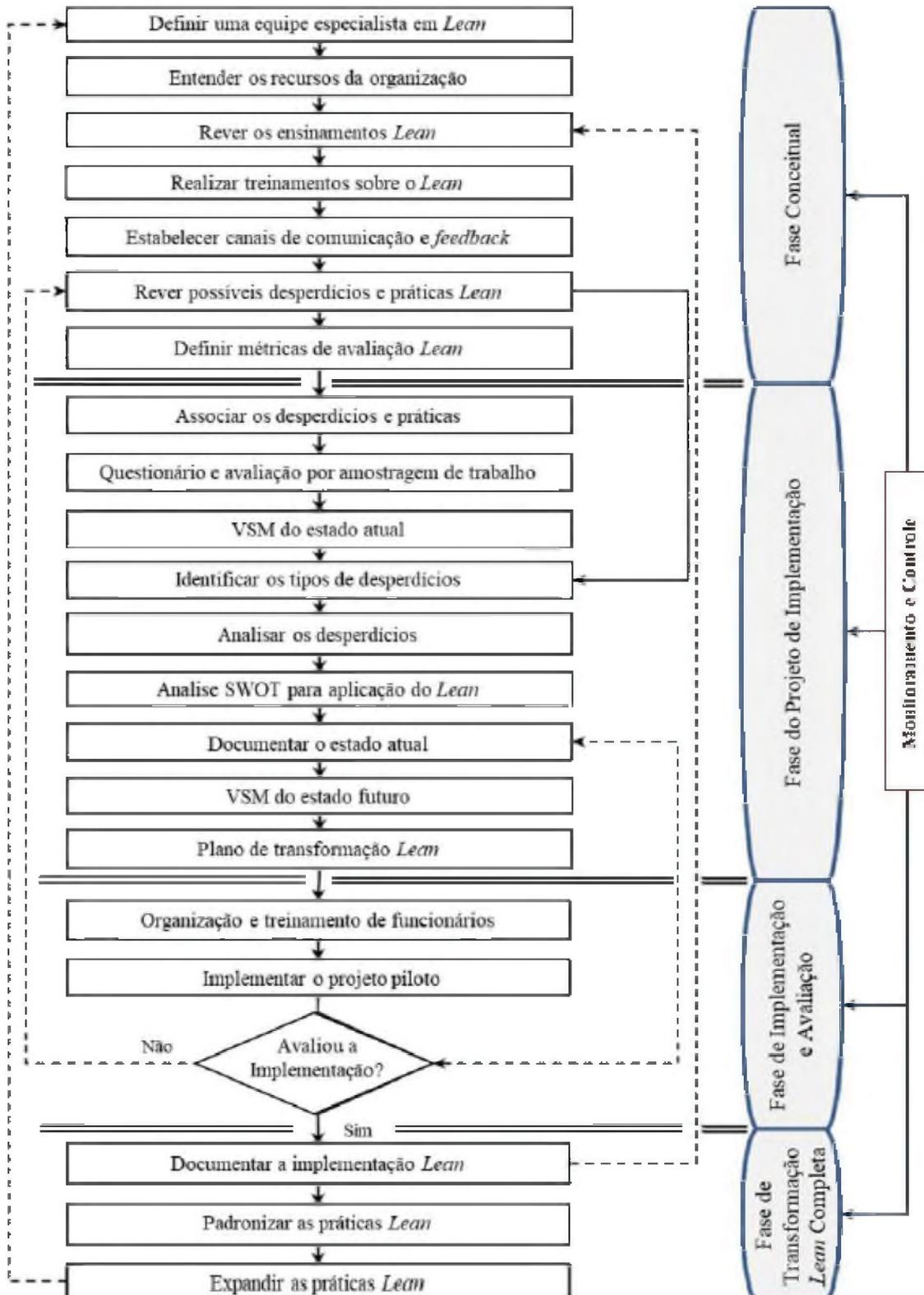
A segunda fase é a “Fase do projeto de implementação”, que tem como objetivo elaborar o projeto *Lean* e preparar a equipe para a prática, identificando o estado atual e os requisitos do *Lean* organizacional por meio de várias análises. As ferramentas recomendadas para esta fase enfatizam principalmente o processo de tomada de decisão para entregar uma implementação bem-sucedida, sendo elas: *Analytic*

Hierarchy Process (AHP), *Value Stream Mapping (VSM)*, análise de lacunas, análise SWOT, diagrama de causa e efeito, entre outras.

Com a equipe definida e treinada, o plano de implementação *Lean* pronto e a unidade definida para implementação se inicia a terceira fase, a “Fase de implementação e avaliação”, ela se baseia na realização de um projeto piloto para criar um protótipo ou uma implementação experimental, com o objetivo de garantir que qualquer expansão do desenvolvimento do projeto *Lean* seja baseada na precisão, eficácia e eficiência. O processo de avaliação da implementação auxilia na reavaliação das estratégias de implementação, podendo ser feita por meio de questionários.

Por fim, a quarta e última fase, “Fase da completa transformação do *Lean*”, busca documentar toda e qualquer mudança no escopo durante a execução da implementação, o estabelecimento de novos padrões *Lean* e o planejamento da melhoria contínua.

FIGURA 5 - Estrutura proposta para implementação da manufatura enxuta



Fonte: Adaptado de Mostafa, Dumrak e Soltan (2013).

Para se ter uma transformação *Lean* bem-sucedida é preciso garantir que todas as mudanças necessárias aos requisitos estabelecidos sejam implementadas, pois a partir desse processo se tem uma padronização. Além disso, expandir as práticas do escopo da implementação é um indicador de melhoria contínua, enquanto o envolvimento das partes interessadas em todos os níveis deve ser incluso.

Nesse mesmo sentido, Azevedo (2011) apresenta um modelo de implementação do *Lean Manufacturing* baseado em quatro grandes ações faseadas mais objetivas, conforme mostra a Figura 5. Em uma primeira ação, o foco está na criação de uma cultura e desenvolvimento de competências *Lean* (preparação conceitual), dessa forma, os colaboradores terão o conhecimento necessário das ferramentas que servirão de apoio à implementação do sistema de Produção *Lean*.

A segunda ação é baseada na realização de um projeto-piloto em ambiente controlado, que permite testar e validar os conceitos aprendidos na ação anterior em uma área produtiva definida. Durante a aplicação do projeto-piloto serão coletadas informações para realizar análises e diagnósticos. Em seguida, um plano de ações de melhoria deverá ser realizado, definindo um planejamento detalhado e a elaboração de um cronograma de implementação.

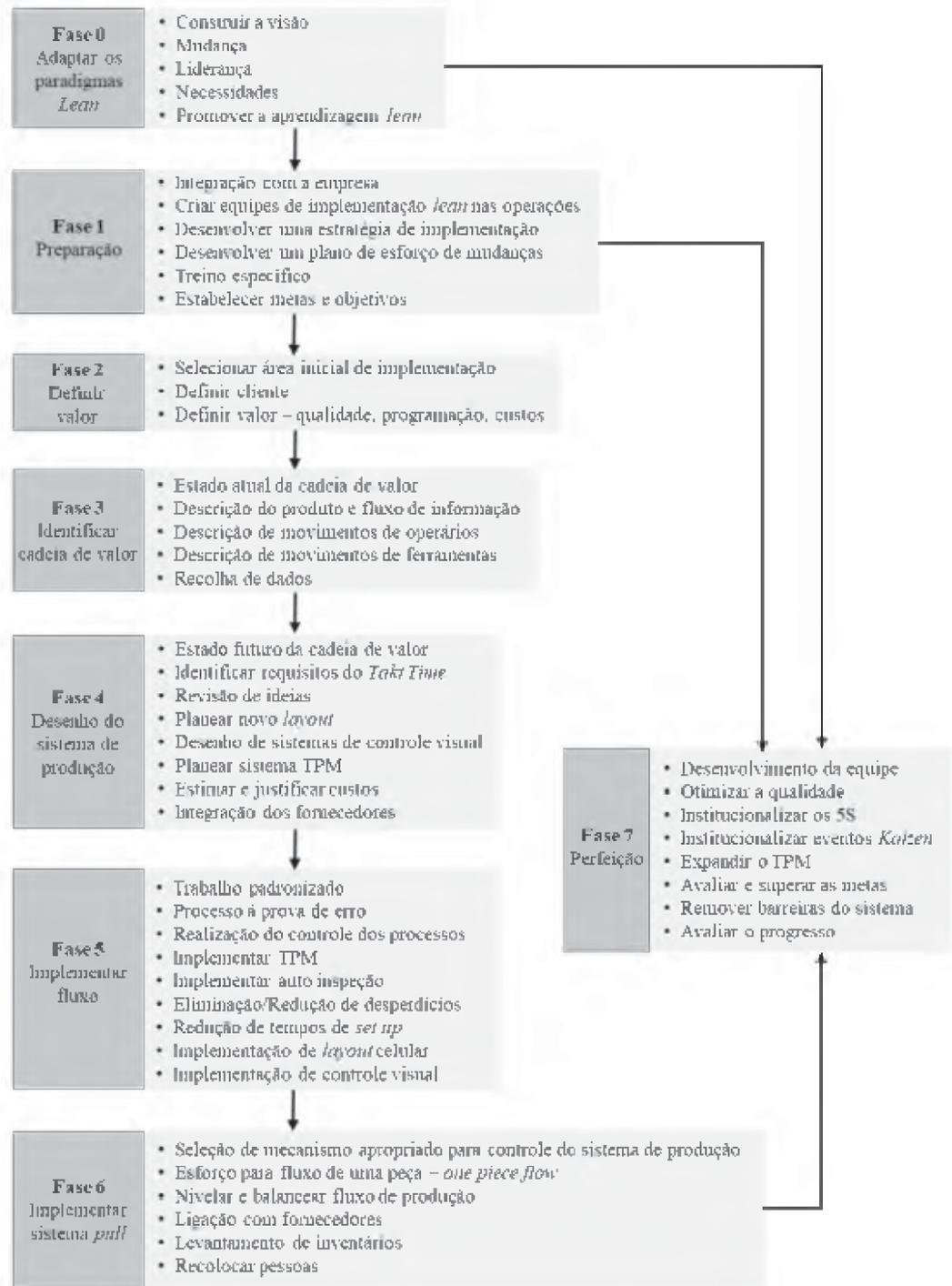
Já a terceira ação é a implementação do projeto-piloto, levando em consideração a aplicação das ferramentas *Lean*, identificação de oportunidades e eliminação de desperdícios, implementação de novos sistemas e melhoria da produtividade.

Por fim, a última etapa consiste na aplicação geral dos conceitos *Lean* em toda a empresa, ou seja, a partir da obtenção do sucesso da implementação dessas técnicas com o projeto piloto, se inicia a expansão do projeto de fato.

Com relação ao projeto-piloto, os autores ressaltam que há cinco etapas básicas para o desenvolvimento de uma estratégia de melhoria do processo, sendo elas: avaliar o estado atual, determinar o estado futuro, identificar a estrutura organizacional do estado futuro estabelecendo as ferramentas e técnicas *Lean*, identificar as prioridades e desenvolver os planos.

Como já citado anteriormente, a Figura 6 apresenta um modelo de implementação *Lean* dividido em várias fases, onde é possível ver sua evolução e técnicas utilizadas são fornecidas servindo como um guia para a jornada de implantação da filosofia.

FIGURA 6 - Roteiro implementação Lean



Fonte: Adaptado de Azevedo 2011.

3.1.8 Casos de implementação do *Lean Manufacturing*

Oliveira, Mendes e Costa (2018) apresentam um caso de implementação do Sistema de Produção Enxuta em uma indústria de autopeças. O processo de

implantação iniciou com a coleta de dados sobre as informações dos processos, onde foram verificados grandes desperdícios de tempo, matéria-prima e recursos financeiros, além do não cumprimento dos prazos de entrega por parte da empresa.

Os autores propuseram a implementação do STP em quatro fases distintas e bem definidas entre si. A primeira, denominada “Fase de preparação” teve como objetivo reconhecer o layout da fábrica, mapear os processos existentes, coleta de indicadores e construção do Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) do estado atual. Na fase seguinte, “Fase de intervenção”, foi aplicado o treinamento sobre o Programa 5S e posteriormente realizado o dia “D” com os colaboradores da empresa, também foram colocados em prática Procedimentos Operacionais Padrões (POP’s).

Na terceira fase, “Fase de monitoramento”, foi implementado um quadro de gestão à vista para acompanhamento dos indicadores de desempenho do estado atual. Por fim, na “Fase de encerramento” foram apresentados todos os índices obtidos após a implementação das metodologias e ferramentas expostas anteriormente, além de índices como: produtividade, movimentação, retorno financeiro e indicadores de desempenho.

Com a implementação do STP proposto por Oliveira, Mendes e Costa (2018) e com as melhorias adquiridas e redução de perdas, a empresa conseguiu reduzir seu preço de venda, além da redução no tempo de entrega, cumprindo então os prazos estabelecidos com os clientes.

No mesmo sentido, Phelipe (2018) retrata um estudo realizado em uma empresa do ramo de máquinas agrícolas, cujo objetivo é analisar os resultados e as barreiras da implantação do sistema *Lean Manufacturing*. O trabalho é um estudo de caso, a coleta de dados se deu através de observação e análise documental e a análise foi feita a partir das ferramentas de suporte do sistema *Lean*, como Mapeamento do Fluxo de Valor e da logística interna, *kanban*, células de produção, 5S e troca rápida de ferramentas.

Dessa forma, os autores perceberam que as principais barreiras encontradas na implantação do *Lean Manufacturing* foram a falta de padronização, falta de disciplina, falta de conhecimento técnico e resistência à mudança. Para superar a falta de padrão e disciplina a empresa em questão padronizou a execução de cada atividade através dos POP’s e implantou autoavaliações para avaliar a disciplina; com relação à resistência à mudança foi necessário implantar ações como a de dar

segurança aos funcionários, discutir os resultados alcançados, abrir canal de comunicação, manter aproximação com os funcionários, estimular a participação deles e mitigar os focos de resistência. Como resultado da implantação, houve uma redução de 76% do inventário em processo, redução de 81% da área ocupada, encurtamento de 90% no ciclo financeiro e aumento do giro de estoque em 77%.

Já Hodge et al. (2011) descreveram um estudo para determinar quais princípios *Lean* são adequados para implementação em indústrias têxteis. Conforme os autores, para a implantação da filosofia, cinco níveis devem ser percorridos. No primeiro, uma política de desenvolvimento de ferramentas deve ser elaborada com o objetivo de iniciar uma mudança cultural, uma vez que foi identificada resistência à mudança tanto pela gerência quanto pelos funcionários de chão de fábrica.

Para o próximo nível os autores propõem a elaboração de uma gestão visual através de *Andons*, para controle das operações; projetos 5S; programa TPM. No terceiro nível, Hodge et al. (2011) defendem a criação de projetos de melhoria contínua voltados aos colaboradores de chão de fábrica, para que estes sejam capazes de identificar áreas de melhoria e utilizar ferramentas – como análise da causa raiz e *poka-yokes* – para identificar e propor soluções para problemas.

O nível seguinte envolve a padronização e estabilidade dos processos, através de instruções de trabalho, identificação dos tempos de ciclo e construção de sequências de trabalho. Por fim, no último nível deve ocorrer a aplicação de ferramentas, como *kanban* para alcançar o *Just in Time*. Os autores ainda destacam que o Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) pode ser desenvolvido em qualquer um dos níveis de implementação.

4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ETANOL

4.1 RESUMO HISTÓRIA DO ETANOL

Nas últimas décadas, a percepção sobre práticas sustentáveis incrementou-se consideravelmente entre governos e indústrias ao redor do planeta. Com o objetivo de reduzir o efeito estufa, os biocombustíveis emergiram como uma alternativa viável para a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis e para a produção de energia mais sustentável. Entre os biocombustíveis, se sobressai o etanol, que pode

ser produzido por meio do processamento de diversas culturas, como cana-de-açúcar, milho, sorgo, mandioca e beterraba (INTARAMAS et al., 2019; SANTOS et al., 2022).

O etanol no Brasil tem uma trajetória marcada pela forte influência da legislação, que moldou seu crescimento, declínio e posterior retomada. A regulamentação começou com o Decreto nº 22.789 de 1933, que criou o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), e seguiu com o Decreto-Lei nº 737 de 1938, tornando obrigatória a mistura de álcool anidro à gasolina. Ao longo dos anos, diversas legislações e decretos impactaram o setor, destacando-se o Proálcool de 1975, um marco importante no incentivo ao uso do álcool como combustível durante a crise do petróleo.

Nos anos seguintes, outras legislações continuaram a moldar o setor, como a Constituição de 1969, que dava ao Estado o poder de regular a produção de etanol, e a Constituição de 1988, que passou a garantir maior liberdade econômica, embora ainda sob regulamentação do Estado. A criação de órgãos como o Conselho Nacional do Alcool (CNAL), em 1979, e o Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool (CIMA), em 1997, foram importantes na formulação de políticas públicas para o setor.

A partir de 1997, com a Lei do Petróleo (Lei nº 9.478/1997), que estabeleceu a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), a regulamentação dos combustíveis no Brasil ganhou maior estrutura, com a ANP assumindo a responsabilidade pela regulação e fiscalização do etanol, que passou a ser considerado um biocombustível dentro do contexto energético nacional.

Nos anos 2000, a ANP implementou resoluções específicas sobre as especificações e comercialização do etanol, como a Resolução ANP nº 36/2005, que detalhou as normas para o etanol hidratado e anidro. A legislação também passou a regular o percentual de álcool anidro misturado à gasolina, variando ao longo dos anos de 22% para 25% em alguns períodos.

Atualmente, o mercado de etanol no Brasil continua sendo regulado pela ANP e pelo CNPE, com o objetivo de garantir a sustentabilidade do setor e atender à demanda por biocombustíveis, além de promover a pesquisa e a adoção de novas tecnologias.

4.1.1 Proálcool

O Programa Nacional do Álcool (Proálcool) foi um marco na história do setor sucroalcooleiro no Brasil, tendo sido criado para enfrentar a crise do petróleo na década de 1970, ao mesmo tempo em que buscava alternativas energéticas. Abaixo está um resumo detalhado de sua evolução ao longo dos anos, desde sua criação até os dias atuais:

4.1.1.1 Criação do Proálcool (1975)

Em 14 de novembro de 1975, o governo brasileiro criou o Proálcool com o Decreto nº 76.593. O programa foi uma resposta à crise do petróleo de 1973, quando o Brasil enfrentou o aumento dos preços do petróleo importado e a escassez de combustíveis. O objetivo inicial do Proálcool era incentivar a produção de etanol (álcool etílico) a partir da cana-de-açúcar, e utilizá-lo como alternativa ao petróleo, tanto no setor de transporte quanto na indústria.

O programa visava:

- Substituir parte da gasolina por etanol.
- Incentivar a produção de etanol, principalmente a partir da cana-de-açúcar.
- Promover o crescimento da indústria automobilística com a produção de veículos a álcool.
- Estimular o desenvolvimento de destilarias e unidades de processamento de cana.

Para viabilizar o programa, o governo ofereceu incentivos fiscais, créditos subsidiados e financiamentos com juros baixos para produtores e empresas do setor. O Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA) ficou responsável por formular as políticas do programa e coordenar sua implementação.

4.1.1.2 Expansão do Proálcool (final da década de 1970 e anos 1980)

Nos primeiros anos, o Proálcool foi bem-sucedido. Em 1979, o Fiat 147, o primeiro carro movido a etanol 100% fabricado no Brasil, foi lançado. Além disso, o

governo criou o Conselho Nacional do Álcool (CNAL), em 1979, para planejar e regulamentar o programa, além de monitorar a produção de etanol.

Na década de 1980, o programa se expandiu significativamente, e o Brasil passou a ser um líder mundial na produção de etanol. O Decreto nº 84.575 de 1980 permitiu o financiamento de unidades armazenadoras de etanol por bancos privados, e em 1981 o governo autorizou a criação de destilarias menores, permitindo a entrada de pequenos produtores no mercado.

4.1.1.3 Crise do Proálcool e Reavaliação (fim da década de 1980 e início de 1990)

No final da década de 1980, a indústria do etanol enfrentou uma crise devido a vários fatores:

- Excesso de oferta de etanol: A produção cresceu mais do que a demanda.
- Queda dos preços do petróleo: A crise do petróleo foi superada e os preços internacionais caíram.
- Problemas técnicos: A tecnologia dos veículos movidos a etanol não evoluiu como esperado, o que gerou dificuldades em relação à eficiência e ao desempenho dos carros.

Além disso, a Constituição de 1988 alterou a forma de gestão econômica do país, dando maior espaço para a livre concorrência e reduzindo a intervenção estatal no setor.

Diante disso, em 1990, o governo decidiu reorganizar o setor e extinguir o Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), transferindo suas atribuições para a Secretaria do Desenvolvimento Regional. A Lei nº 8.029/1990 também autorizou a privatização de várias empresas do setor, e o governo reduziu sua participação direta na produção de etanol.

4.1.1.4 Renascimento do Proálcool e Consolidação (anos 1990 e 2000)

Nos anos 1990, apesar das dificuldades enfrentadas, o etanol brasileiro passou a ser visto como uma alternativa energética sustentável. Em 1997, a Lei do Petróleo (Lei nº 9.478) instituiu a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e o Conselho Nacional

de Política Energética (CNPE), permitindo um novo modelo de regulação do setor de combustíveis, incluindo o etanol.

Em 2003, o governo brasileiro lançou o Programa de Incentivo às Tecnologias Alternativas (PITTA), que visava ao desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de biocombustíveis, incluindo o etanol. A partir desse momento, o Brasil passou a investir em novas pesquisas e inovações para melhorar a produção e o uso do etanol, aumentando a competitividade da indústria no mercado global.

4.1.1.5 Etanol e o Álcool como Biocombustível (2000 e 2010)

A partir dos anos 2000, o Proálcool foi modernizado e ampliado para atender às novas demandas do mercado internacional de biocombustíveis. O Brasil se tornou um líder mundial na produção de etanol, principalmente devido ao aumento das exportações para países como os Estados Unidos e a União Europeia, que estavam buscando fontes alternativas de energia.

Em 2003, o governo implementou o Programa de Produção e Uso do Biodiesel, que complementou as políticas de biocombustíveis, e a indústria do etanol passou a ser associada a novos avanços tecnológicos. O carro flex (bicombustível), lançado em 2003, foi um dos maiores avanços dessa era. Esse tipo de veículo permite ao motorista escolher entre etanol ou gasolina, o que aumentou ainda mais a demanda pelo etanol.

4.1.1.6 Atualidade do Proálcool (2010 até os dias atuais)

Nos últimos anos, o programa Proálcool continuou a ser uma parte fundamental da política energética brasileira. A Resolução ANP nº 9, de 2009, obrigou os postos de gasolina a rotularem o combustível como "etanol", em vez de "álcool", para padronizar o biocombustível brasileiro no mercado internacional. Além disso, o governo manteve a percentagem de mistura de etanol anidro na gasolina, que foi de 25% em 2010 e foi ajustada ao longo dos anos com base nas condições econômicas e na oferta de etanol.

Hoje, o etanol do Brasil é considerado um dos combustíveis mais eficientes e sustentáveis do mundo, e o país continua sendo um dos maiores produtores e exportadores de etanol. O setor sucroalcooleiro brasileiro é um exemplo de

biocombustível sustentável, utilizando a cana-de-açúcar para gerar energia renovável e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Além disso, o Brasil tem trabalhado para desenvolver a sustentabilidade ambiental na produção de etanol, por meio de práticas agrícolas mais eficientes e tecnologias de redução de emissões de carbono.

O Proálcool passou por diferentes fases desde sua criação em 1975, enfrentando desafios econômicos, tecnológicos e regulatórios. No entanto, o programa evoluiu ao longo dos anos, adaptando-se às novas demandas do mercado e ao contexto energético mundial. O etanol tornou-se uma parte crucial da matriz energética do Brasil, e o país se consolidou como líder global no setor de biocombustíveis, refletindo o sucesso e a longevidade do programa iniciado nos anos 70.

4.2 Etanol de Milho

4.2.1 Etanol de Milho – Mercado Global

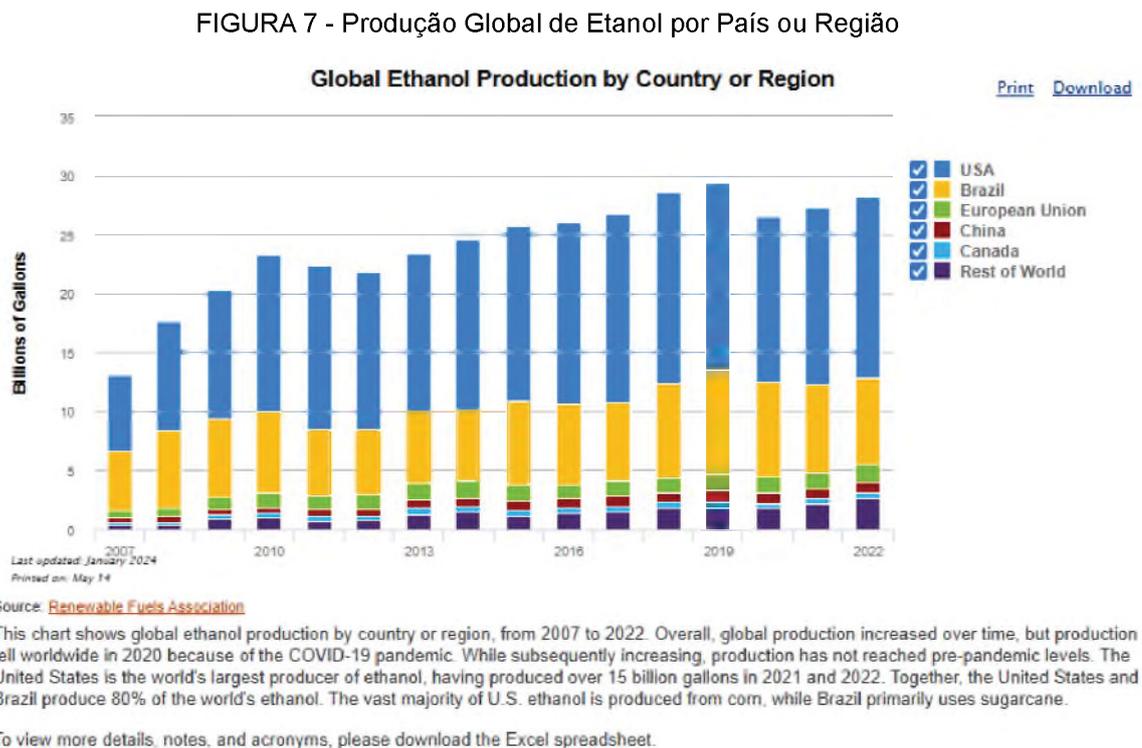
O mercado global de etanol cresce frente a preocupação com o uso dos combustíveis fósseis sobre o clima, principalmente no setor de transportes, mas o mundo continua fortemente dependente dessa fonte de energia. Para que os biocombustíveis sejam amplamente usados no mundo, não basta serem sustentáveis ambientalmente, também é necessário ter competitividade frente aos combustíveis fósseis. Diante disso, a demanda mundial por biocombustíveis está correlacionada à adoção de políticas públicas como misturas obrigatórias, sistema de tributação diferenciada e subsídios. Segundo Costa et al. (2017), a principal regra de comercialização de biocombustíveis no mundo são mandados normativos para a mistura.

Os Estados Unidos são o maior produtor, consumidor e exportador de etanol do mundo, tendo o milho como principal fonte de matéria-prima. O percentual da mistura predominante de etanol na gasolina nos EUA é 10% (E10), a infraestrutura, a tecnologia e outras restrições limitam o crescimento da taxa de mistura no país. Em 2023, os EUA exportaram aproximadamente 5,4 bilhões de litros de etanol, enquanto o Canadá, o Reino Unido e a União Europeia foram os principais mercados. Não obstante, as importações americanas de etanol são insignificantes e caíram ainda

mais em 2023, sendo o volume mais baixo dos últimos 10 anos. Praticamente todo o etanol importado pelos EUA é proveniente do Brasil e metade do volume importado vai para a Califórnia, atender ao Programa Padrão de Combustível de Baixo Carbono (LCFS) do Estado (RFA, 2024b).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, com 27,9% do volume global em 2023 (RFA, 2024a), quase que totalmente de cana-de-açúcar, embora, nas últimas safras, se tenha importante crescimento da utilização do milho para produção de etanol no País. Brasil e Estados Unidos responderam por quase 81% da produção mundial de etanol em 2023.

A Figura 7 mostra a produção de etanol no mundo e seu crescimento ao longo dos anos.



Fonte: Alternative Fuels Data Center. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/data/10331>, 2025.

A utilização do milho como insumo na fabricação de etanol no Brasil é relativamente recente, iniciando-se em 2012 no estado do Mato Grosso (NEVES et al., 2021). O Mato Grosso é o principal produtor de milho do Brasil totalizando 48,8 milhões de toneladas de um total do Brasil de 115,7 milhões de toneladas produzidas

na safra 2023/24 (IMEA, 2025). Na Figura 8 está demonstrada a produção de milho no estado do Mato Grosso nas últimas safras.

FIGURA 8 - Produção de Milho no Mato Grosso Safras 22/23, 23/24 e 24/25



Fonte: IMEA - INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA. Disponível em: <https://www.imea.com.br/imea-site/dashboards?c=3&d=1136864451708788736>. Acesso em: 14/05/2025.

O elevado volume de produção, combinado com as dificuldades logísticas e financeiras na comercialização e armazenamento da safra de milho, levou os produtores/indústrias a buscarem alternativas que agregassem valor à cadeia do cereal de maneira local (MILANEZ et al., 2014). Assim, o milho passou a ser utilizado como insumo para a produção de bioetanol no Brasil, e tem atualmente apresentado crescimentos significativos. De acordo com a UNEM (2022a), foram produzidos durante a safra 2021/22 cerca de 3,43 bilhões de litros de etanol de milho no Brasil e a temporada 2024/25, a produção do biocombustível de milho cresceu 30,86% sobre o ciclo anterior, segundo levantamento realizado também pelo Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária (IMEA).

O processamento do milho no Brasil para a produção de etanol tem ocorrido em usinas especializadas, podendo incluir etapas para a obtenção de óleo, xarope e DDG (grãos de destiladores secos); ou ainda em instalações anexas às usinas de cana-de-açúcar, sendo estas operadas durante a entressafra da cana, em unidades

denominadas “Usinas Flex” (DONKE et al. 2016). Esse processo tem crescido anualmente, sendo que na safra 2020/2021 foram gerados 2,7 bilhões de litros, e a projeção para é que a produção quintuple até 2030, devido à legislação ambiental vigente no Brasil.

Em termos de política, a mais expressiva no Brasil para o etanol é o RenovaBio que pode ser um instrumento importante para equilibrar a competitividade entre os combustíveis fósseis e renováveis, pois o valor do Créditos de Descarbonização (CBio) é determinado, entre outras variáveis, pelo preço do petróleo para garantir a competitividade dos biocombustíveis. Em 2023, foram emitidos 33,3 milhões de créditos de descarbonização (CBios), a quantidade de CBios disponível (emitidos mais estoque) somaram 39,3 milhões, nesse ano, 31,3 milhões foram tirados de circulação (aposentados) pelos distribuidores, em 2024 (janeiro a agosto), a quantidade de CBios acumulados foi de 38,07 milhões e 28,2 milhões foram aposentados; cada CBio equivale a uma tonelada de CO₂ que deixou de ser emitida (MME, 2024).

A União Europeia respondeu em 2023 por 4,9% da produção global de etanol, sendo o terceiro maior volume na escala mundial. Os maiores produtores de biocombustíveis na UE são a França, a Alemanha e a Hungria (OCDE/FAO, 2023). A expansão da produção de etanol celulósico na UE permanece limitada devido aos elevados custos de investimentos e incertezas quanto às políticas e programas para biocombustíveis avançados. O percentual da mistura de etanol na gasolina em 15 países da UE é 10% (E10). No longo prazo, o consumo de biocombustíveis na UE não deve aumentar, pois foram estabelecidos limites de uso de biocombustíveis convencionais, e existe ainda, a tendência de crescimento do uso de veículos elétricos com consequente redução no consumo da gasolina e dos biocombustíveis (USDA, 2023a).

A Índia, quarto maior produtor mundial de etanol, estima-se que o percentual de mistura tenha atingido 11,5% em 2023. Nesse ano, foram introduzidos veículos flex fuel no mercado indiano, mas o acesso ao combustível E20, cuja meta foi antecipada para 2025, permanece esporádico. Para ampliar a oferta de etanol, e atingir a meta, o governo indiano está ampliando a capacidade de produção de etanol à base de grãos, pois o desvio de açúcar para fabricação de etanol foi reduzido visando atender o consumo interno e evitar aumento da inflação (USDA, 2023b).

A China é o quinto maior produtor de etanol no mundo, entretanto, o destino é quase exclusivamente interno. Para 2023, as expectativas são de que a produção do biocombustível na China tenha crescido apenas 3,3% em relação a 2022 (Tabela 1), em decorrência da alta cotação do milho, que afeta o custo de produção, e da queda do preço da gasolina, que reduz a demanda pelo biocombustível, além disso, o consumo tem se recuperado lentamente após o fim da política “Zero Covid” (USDA,2023c). O Programa de biocombustíveis na China está relacionado ao volume de estoques disponíveis de milho, principal matéria-prima usada para produção de etanol no país. Há entendimento comum de que o plano de implementação da mistura de 10% de etanol na gasolina no país foi interrompido, pois a demanda é limitada e as elevadas tarifas inviabilizam as importações de etanol.

TABELA 1 - Maiores produtores de Etanol

Países	2019	2020	2021	2022	2023	2023 (%)	Variação 2022-2023 (%)
EUA	59.726	52.772	56.842	58.148	59.128	52,8	1,7
Brasil	33.539	30.662	27.709	28.012	31.267	27,9	11,6
União Europeia	5.224	5.035	5.337	5.527	5.451	4,9	-1,4
Índia	1.893	1.968	3.293	4.656	5.413	4,8	16,3
China	3.861	3.558	3.407	3.483	3.596	3,2	3,3
Canadá	1.881	1.624	1.643	1.692	1.741	1,6	2,9
Tailândia	1.628	1.476	1.325	1.401	1.401	1,3	-
Argentina	1.098	795	1.022	1.173	1.136	1,0	-3,2
Selecionados	108.849	97.891	100.578	104.091	109.133	97,4	4,8
Outros	2.442	2.347	2.574	2.733	2.877	2,6	5,3
Mundo	111.291	100.238	103.152	106.824	112.010	100,0	4,9

Fonte: RFA - Renewable Fuels Association (2024a).

Fonte: RFA – Renewable Fuels Association (2024).

4.2.2 Etanol de Milho – Mercado Brasileiro

O Brasil se destaca no mundo pela tecnologia dos carros *flex* que podem utilizar qualquer percentual de gasolina e etanol hidratado. Por ser considerado uma fonte de energia limpa e renovável, esse biocombustível possui grande importância para a sustentabilidade ambiental. Entretanto, a tendência mundial é de crescimento do mercado de carros elétricos e o enfraquecimento do apoio ao setor de biocombustíveis.

Por outro lado, o uso do etanol por meio da tecnologia dos veículos híbridos, que combinam motores elétricos com motor a combustão, representa, para o Brasil, a possibilidade de transição menos abrupta da tecnologia dos veículos convencionais para os carros elétricos.

A produção brasileira de etanol é destinada principalmente ao mercado interno, que poderá crescer com o aumento do percentual de mistura obrigatória do etanol à gasolina. No início de setembro de 2024, o Senado aprovou o projeto de lei (PL 528/2020) que institui programas nacionais de diesel verde, de combustível sustentável para aviação e de biometano. O texto dos chamados “combustíveis do futuro” propõe aumento do percentual de etanol na gasolina e de biodiesel no diesel. Para o etanol, o limite mínimo de mistura à gasolina passará a 22% e o máximo pode chegar a 35%, para análise, a matéria retornará à Câmara dos Deputados.

A produção de etanol no Brasil está concentrada no Sudeste e Centro-Oeste, que juntos respondem por quase 90% da produção nacional (etanol de cana e de milho). Na safra 2023/24, foram produzidos no Brasil 35,6 bilhões de litros de etanol. Para a safra 2024/25, a Conab (2024) prevê redução de (-4%) na produção total de etanol no Brasil, sendo esperado aumento na produção de etanol anidro (+6,2%). Entretanto, as perspectivas são de que a produção do hidratado caia (-10,9%), pois a safra continua com tendência mais açucareira. A queda na produção de etanol no Sudeste pode ser ainda maior do que o previsto pela Conab, devido aos efeitos negativos dos recentes incêndios nos canaviais da região.

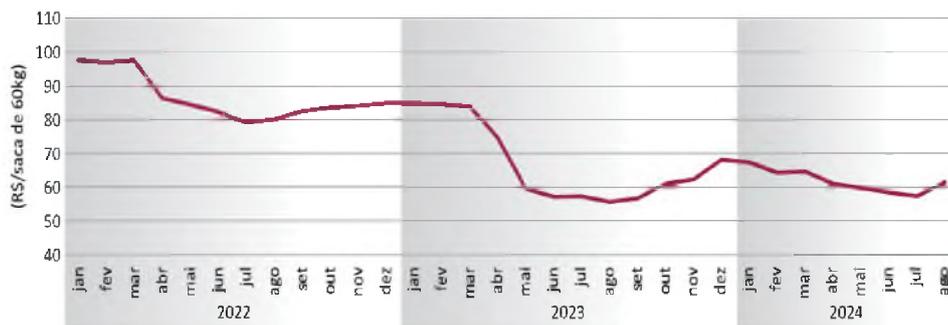
Fato notável, nos últimos cinco anos, a produção de etanol de milho no Brasil apresentou um crescimento extraordinário de 800%, passando de 520 milhões de litros para 4,5 bilhões de litros. Com investimentos projetados de R\$ 19 bilhões nos próximos sete anos, o Brasil se estabelece como o segundo maior produtor mundial de etanol de milho, apenas atrás dos Estados Unidos. Empresas do setor estão aproveitando as tecnologias disponíveis e os mercados emergentes expandindo suas atividades, beneficiando-se da capacidade do milho de ser armazenado e processado durante todo o ano, ao contrário da cana-de-açúcar (Lingopass, 2024).

Nos últimos anos, tem-se observado uma tendência de crescimento dos investimentos em usinas de produção de etanol de milho no Brasil, em especial na região Centro-Oeste, resultado da combinação de diversos fatores tais como o mercado consolidado para o etanol no Brasil, preços remuneradores para o

biocombustível nos últimos anos, forte demanda dos segmentos produtores de proteína animal por DDGS (*Dried Distillers Grains With Solubles, sigla em inglês para grãos secos de destilaria, utilizados na ração animal*), e grande disponibilidade de matéria-prima. O Centro-Oeste responde por aproximadamente 57% da produção nacional de milho, sendo que o mercado local para grãos de milho é limitado e há dificuldade de escoamento da produção de milho devido à precária infraestrutura que dificulta as exportações.

Outra variável que influencia a produção de etanol de milho é o preço do grão, pois o milho representa a maior parcela do custo de produção. Em 2023, os preços internos do milho caíram fortemente em decorrência da queda das cotações no mercado mundial e da grande disponibilidade do grão no mercado doméstico. Após alguns meses de relativa estabilidade, houve recuperação dos preços a partir de agosto de 2023, mas voltaram com tendência de queda em 2024 (Gráfico 1). No curto prazo, as perspectivas são de que os preços do milho voltem a reagir em função do cenário climático incerto (Coelho, 2024), que não deverá trazer impacto imediato nos custos de produção do etanol, pois geralmente os produtores de etanol diminuem os efeitos das oscilações dos preços do milho por meio do mercado futuro.

GRÁFICO 1 - Indicador do Milho ESALQ/MB&FBOVESPA – Janeiro 2022 a Agosto 2024 para saca de 60 kg de milho.



Fonte: Cepea/Esalq (2024).

Fonte: Cepea/Esalq (2024).

O setor produtor de etanol de milho no Brasil tem investido em tecnologia de equipamento de produção e de biotecnologia, o que tem conferido produtividades muito próximas às obtidas nos EUA. De acordo com Nastari (2018), coexistem atualmente no Brasil dois modelos de unidades de produção de etanol de milho, as

plantas que só processam milho (*full*) e as plantas integradas com as usinas que processam cana-de-açúcar e grãos (*flex*).

Para as usinas de cana instaladas próximas as regiões produtoras de grãos, existem grandes vantagens em também produzir etanol de milho, dentre as quais podem ser destacadas:

- Possibilidade de estender o período de safra de etanol utilizando energia do bagaço que já é utilizado como biomassa para geração da energia necessária no processo industrial e para a cogeração de energia elétrica;
- O milho possui a vantagem de poder ser armazenado, portanto, é possível produzir durante todo o ano;
- O investimento para começar a produzir etanol de milho é menor comparado às usinas que processam apenas o milho, pois as usinas de cana já contam com parte dos equipamentos necessários para produção de etanol de milho e infraestrutura, a exemplo de caldeira, turbina, gerador, área de carregamento, balança, prédio administrativo entre outros, reduzindo o CAPEX;
- A flexibilidade industrial da produção de açúcar e álcool das usinas de cana com destilaria anexa, que já é uma vantagem para o setor, é ampliada com a possibilidade de utilização de duas fontes de matéria-prima, o que torna a empresa menos vulnerável às condições de mercado;
- Além do etanol, há produção de coprodutos de elevado valor agregado, como o óleo, o xarope de milho e o DDGS. A utilização do DDGS pode ter um papel importante na intensificação da pecuária no Brasil, com agregação de valor das proteínas animais e liberação de áreas para a produção agrícola. O forte crescimento das exportações nacionais de DDGS é um indício de que a demanda mundial por esse produto é crescente.

Vale ressaltar que a unidade produtora de etanol de milho instalada dentro da usina de cana é uma linha independente, opera o ano todo exclusivamente com milho. Os preços remuneradores de etanol e açúcar, nos últimos anos levaram a aumento

da demanda por projetos de biorrefinaria de milho por parte das usinas de cana no Brasil.

De acordo com a ANP, existem 22 unidades industriais autorizadas a produzir etanol de cereais no Brasil, sendo umas em São Paulo, duas em Goiás, cinco no Mato Grosso do Sul e quatorze no Mato Grosso. A capacidade de produção dessas unidades é de 18.672 m³/dia de etanol anidro e 25.523 m³/dia de hidratado. Segundo a União Nacional de Etanol de Milho, onze dessas unidades utilizam apenas milho como matéria-prima (UNEM, 2024).

Existem ainda na ANP, 15 solicitações para autorização de construção de novas instalações e 5 solicitações para ampliação da capacidade autorizada, assim, até 2026, a capacidade de produção de etanol de cereais no Brasil poderá ser ampliada em 34.240 m³/dia.

Na safra 2022/23, o volume de produção de etanol de milho no País representou 12% da produção total de etanol e deverá chegar a 20,3% na safra 2024/25, com uma estimativa de alcançar 6,7 bilhões de litros, um crescimento de 56% na produção de etanol de milho no País em relação à safra 2022/23.

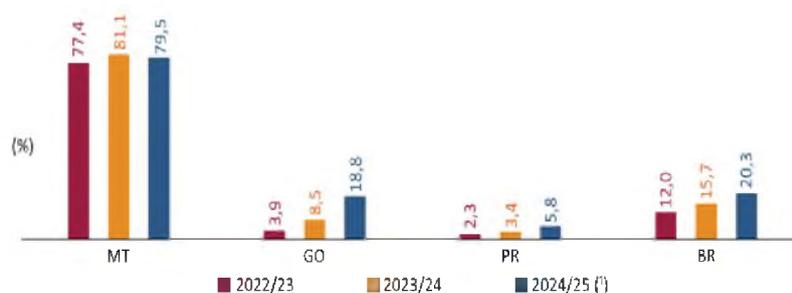
A Região Centro-Oeste responde por mais de 30% da produção nacional de etanol (milho e cana) e por 95% da produção de etanol de milho. A principal fonte de milho para a produção de etanol no Centro-Oeste é o milho de segunda safra, o qual é produzido após a colheita da soja.

Mato Grosso é o maior produtor nacional de etanol de milho, sendo na última safra, 81% do biocombustível produzido no Estado a partir do milho (Gráfico 2). Existem atualmente no Mato Grosso, quatorze unidades autorizadas pela ANP a produzir etanol de cereais, totalizando uma capacidade de produção de 13.602 m³/dia de etanol anidro e 16.698 m³/dia de hidratado. Outras sete biorrefinarias estão previstas para começarem a operar até 2026 no Estado (ANP, 2024).

A participação do etanol de milho na produção total do biocombustível está crescendo fortemente também em Goiás; na safra 2022/23, o etanol de milho representou 3,9% do volume total do biocombustível produzido no Estado e, para a safra 2024/25, esse percentual deverá passar a 18,8% (Gráfico 2). O Estado conta com cinco biorrefinarias de etanol de milho em produção e mais uma nova unidade deverá começar a produzir até o final de 2025 (ANP, 2024). Gráfico 2 – Participação

percentual do etanol de milho na produção total de etanol (estados selecionados e Brasil) Fonte: Conab (2024).

GRÁFICO 2 - Percentual do etanol por estado na produção nacional de etanol.



Fonte: Conab (2024).

Fonte: Conab (2024).

Os estados mencionados no gráfico acima são referência no agronegócio nacional.

4.2.3 Processo de Produção de Etanol de Milho

4.2.3.1 Cadeia do Etanol de Milho

O setor do etanol de milho e cereal brasileiro é reconhecido mundialmente pela sustentabilidade de seu modelo produtivo, que utiliza como fonte de energia biomassa, matéria-prima renovável e pouco poluente. Além disso, a alta tecnologia das biorrefinarias viabiliza um maior rendimento industrial e disponibilização de produtos que vão além do biocombustível, como DDG/DDGS, óleo de milho e bioeletricidade (Unem, 2024).

FIGURA 9 - Fluxograma simplificado de massa e energia



Fonte: Unem (2024)

O etanol de milho é um biocombustível utilizado, principalmente, na mobilidade urbana, em veículos de passeio. Nas últimas décadas, com a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, outros veículos e meios de transportes estão adaptando seus motores para que possam utilizar o etanol como fonte de energia, como é caso de ônibus, aviões e embarcações (Unem, 2024).

O DDG (Dried Distillers Grains – Grãos Secos de Destilaria), DDGS (Dried Distillers Grains with Solubles – Grãos Secos de Destilaria com Solúveis) e o WDG (Wet Distillers Grains – Grãos Úmidos de Destilaria) são grãos de milho secos por destilação originados na indústria de etanol de milho. Estes são alguns dos farelos altamente proteicos produzidos por este setor e utilizados como fonte de alimento na criação de animais como bovinos, suínos, equinos, aves, peixes e pets (Unem, 2024).

Com a expansão do mercado do etanol de milho no Brasil, os farelos começam a ser ofertados no mercado nacional e internacional, com importância crescente, principalmente para a produção de proteínas de origem animal para o consumo humano, bem como a alimentação dos animais de companhia (Unem, 2024).

O óleo vegetal produzido nas biorrefinarias é um importante insumo para o enriquecimento energético da ração, podendo ser utilizado para nutrição de suínos e

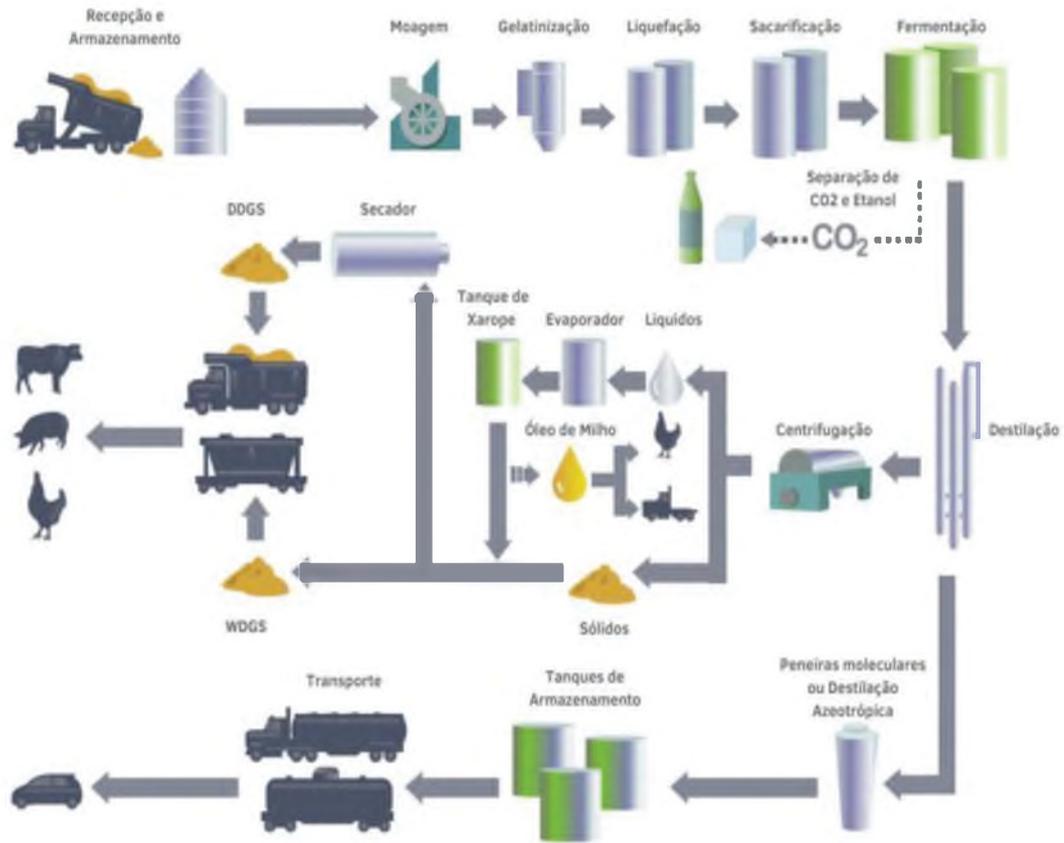
aves. Mas não é só isso, o óleo também pode ser utilizado pela indústria química de forma geral. (Unem, 2024)

As usinas de etanol de milho utilizam biomassa para produção de energia elétrica e o excedente desta é distribuído para a rede de distribuição de energia (Unem, 2024).

4.2.3.2 Processo Produtivo de Etanol de Milho

A produção de etanol de milho pode ser descrita basicamente como um processo de cinco estágios principais: pré-tratamento da matéria-prima, hidrólise/sacarificação, fermentação, destilação e separação. Além disso, o beneficiamento do milho nas indústrias pode acontecer por meio de processos de moagem seca e úmida. Na Figura 10 está apresentado um fluxograma simplificado da produção de etanol de milho.

FIGURA 10 - Processo simplificado de Produção de Etanol de Milho



Source: RFA

Fonte: Adaptado de RFA (2021).

4.2.3.2.1 Preparo Da Matéria-Prima

A colheita do milho é realizada de forma mecânica através de colheitadeiras que separam a espiga do colmo e os grãos de milho da espiga, tendo como resíduo o sabugo e a palha, comumente chamados de palhada, utilizadas como cobertura do solo no campo, ou também como biomassa para geração de energia (ZAMBRZYCKI; DO VALE; DANTAS, 2014). Os grãos coletados são transportados para as plantas de produção através de caminhões ou linhas ferroviárias. Ao chegar na planta esse milho é pesado e analisado para determinar a qualidade da matéria-prima, bem como avaliar se há presença de contaminantes que possam prejudicar o processo produtivo (CONAB, 2015).

Após as análises, segundo Grippa (2012), além de limpo, o material deve ser seco de forma adequada para que a estabilidade de sua qualidade seja mantida, uma vez que, quando armazenados, os grãos estarão sujeitos a deterioração devido a fenômenos físicos, químicos e biológicos. Para serem armazenados, a umidade do milho deve ser aproximadamente 12 a 13% (SENAR, 2018), mas segundo Fonseca (2021) o milho pode ser colhido com aproximadamente 20% de umidade, sendo assim necessários os processos de secagem antes de serem enviados para os silos.

Também é importante salientar que, dependendo da temperatura do ar, pode haver diminuição do teor de proteínas e aminoácidos, e também um aumento no grau de gelatinização do amido (MILANE, 2015; VOCA et al., 2009), assim, o controle de temperatura é essencial nessa parte do processo.

No processo de limpeza, são retirados sabugos, folhas, caules e detritos remanescentes, podendo assim os grãos de milho serem armazenados em silos. Essa limpeza deve ser realizada para manutenção da qualidade do substrato, mas também para não haver problemas no processamento, como aumento de viscosidade e desgaste de equipamentos (RAUSCH, et al., 2019). Antes de seguir para o processo, o milho também passa por grandes ímãs que retiram qualquer objeto metálico que possa estar misturado no milho, evitando assim maiores danos aos moinhos (GRIPPA, 2012).

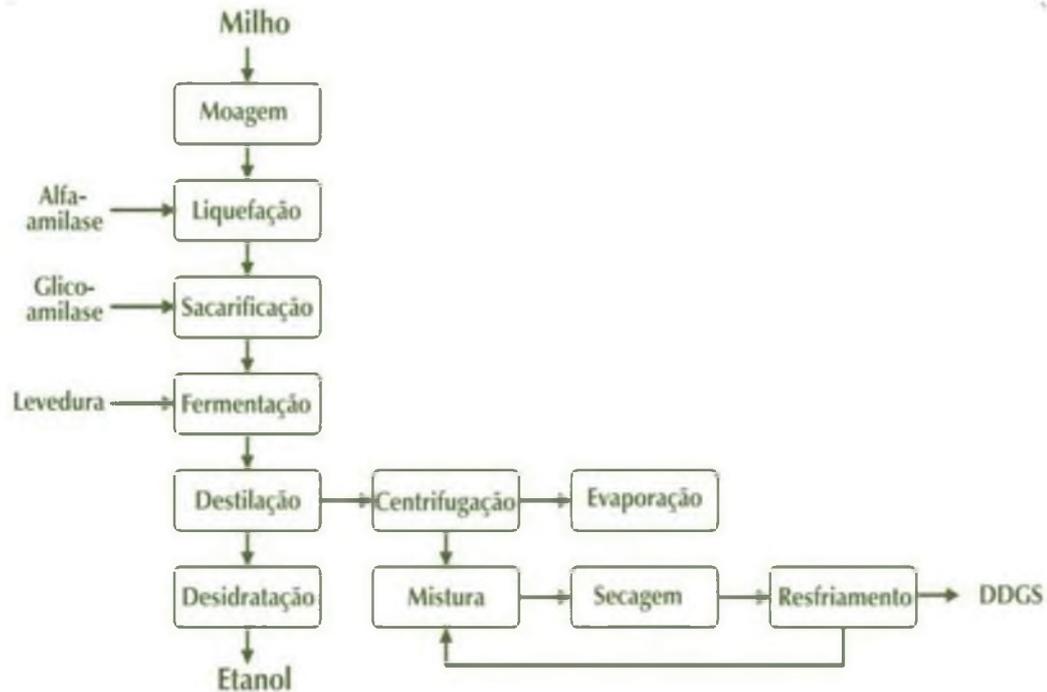
4.2.3.2.2 Moagem Do Milho - Via Seca X Via Úmida

Nos moinhos, o material proveniente dos silos de estocagem é moído por moinhos do tipo martelo, e transformado em um produto chamado de farinha de milho. Nesse processo, é importante salientar a importância de que o tamanho das partículas seja uniforme, uma vez que afeta diretamente a conversão de etanol (GRIPPA, 2012). Segundo Kelsall e Lyons (2003), a granulometria dos finos da moagem pode ser um fator significativo no rendimento final do álcool, podendo apresentar uma diferença entre 5 e 10% no rendimento entre uma farinha grossa e uma farinha fina.

A moagem pode ser realizada de duas formas: moagem seca e moagem úmida. Na moagem via seca, todo o grão é processado, sendo os componentes residuais separados no final do processo. O processamento é dividido em cinco etapas: moagem, liquefação, sacarificação, fermentação, destilação e separação (MOSIER;

KLEIN, 2020). Nesse tipo de moagem, os principais subprodutos obtidos são os DDGs, WDGs e óleo de milho. No processamento via seca, o grão é moído em pó sem adição de soluções aquosas (D'ARCE; SPOTO; CASTELLUCCI, 2019). O fluxograma do processo utilizando moagem seca está representado pela Figura 11.

FIGURA 11 - Fluxograma moagem seca

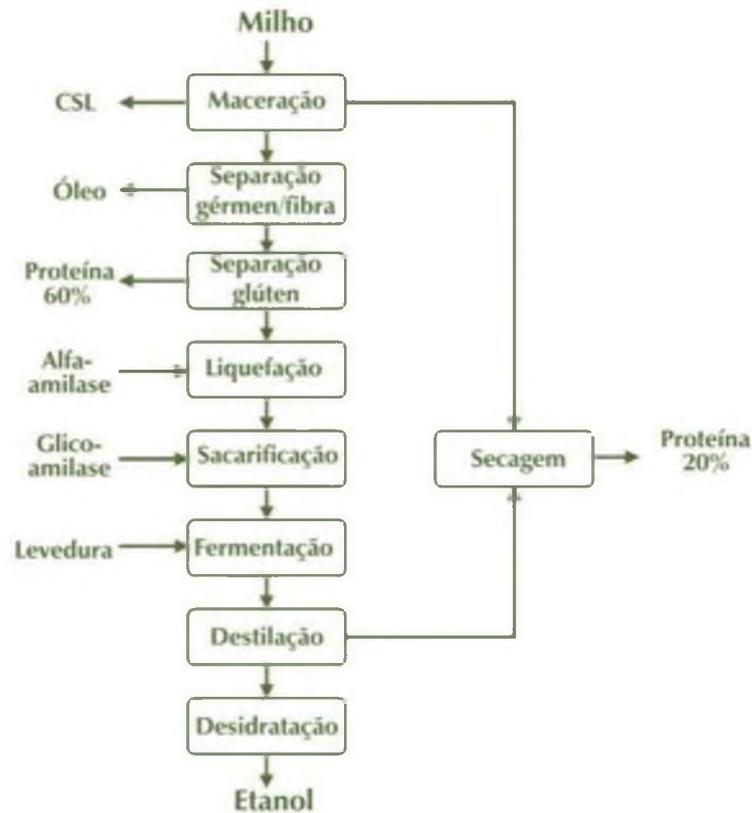


Fonte: BNDES e CGEE (2008).

Na moagem via úmida, ilustrada pela Figura 12, temos a produção de muitos coprodutos: xarope de milho com alto teor de frutose, ácido cítrico, goma xantana, dextrinas, óleo refinado, fibras, farinha de glúten de milho (alta proteína), CSL (licor de maceração do milho), ração de glúten de milho (baixa proteína) e óleo de milho. (MOSIER; KLEIN, 2020; RAUSCH et al., 2019). O processo por via úmida apresenta como etapa adicional anterior à moagem, a maceração dos grãos, onde uma solução de dióxido de enxofre e de ácido láctico são adicionadas à matéria-prima para promover uma melhor separação do amido e das proteínas do milho. A temperatura de maceração deve ser de aproximadamente 52 °C e o pH baixo (MUSSOLINI, 2009). Essa separação dos componentes do milho permite que eles sejam processados

separadamente, facilitando a produção dos variados coprodutos de alto valor agregado, no entanto, não se tem a produção de grãos de destilaria nesse modelo.

FIGURA 12 - Fluxograma via úmida



Fonte: BNDES e CGEE (2008).

Segundo Saville, Griffin e MacLean (2016), na moagem via úmida, a remoção de sólidos após a etapa de maceração leva a um processo mais simplificado de destilação e conseqüentemente mais eficiente em termos energéticos. Entretanto, Perez et al. (2003) constataram que esse tipo de processamento demanda investimentos elevados, além de um alto tempo de produção, podendo atingir 48 horas, devido à resistência do milho em absorver água e SO₂. Nesse processo, temos também a utilização de um grande volume de água, 1,2 a 1,4 toneladas de água para cada tonelada de milho (JACKSON; SHANDERA JR., 1995).

Atualmente, o processo por via seca é mais utilizado devido aos custos operacionais serem inferiores aos de produção por via úmida (BNDES, 2008;

CRIPWELL et al., 2020), além da demanda crescente por DDGs, que faz com que o processamento seco seja viável economicamente para as indústrias.

4.2.3.2.3 Hidrólise Enzimática

A Tabela 2, resume todos os componentes presentes no milho em base seca, destacando primordialmente o amido.

TABELA 2 - Componentes presentes no milho

Componentes presentes no Milho	% Peso
Amido	70-75
Proteína	10
Germen	4-5
Fibra	3-4
Cinzas	2

Fonte: Adaptado de BNDES e CGEE (2008).

O amido é composto por Amilose e Amilopectina, sendo a amilose de cadeia linear de 17 a 25 unidades de glicose e a amilopectina uma cadeia ramificada de 250 a 2000 unidades de glicose. A proporção de Amilose e Amilopectina é de 70-100% e 20-30% respectivamente.

A Tabela 3, destaca as principais enzimas utilizadas no processo de produção de etanol e em quais etapas elas atuam.

TABELA 3 - Enzimas utilizadas no processo de etanol de milho

Enzima	Função Principal	Temperatura Ótima	pH Ótimo	Descrição
Alfa amilase	Liquefação	85-95	5,5 - 6,5	Reduz o tamanho da cadeia de amido atuando nas ligações α -1,4 de forma aleatória
Glucoamilase	Sacarificação	60 - 65	4,0 -4,5	Atua nas ligações α -1,4 e α -1,6 na parte terminal da cadeia.
Pululanase	Desramificação	60 - 65	4,5-5,5	Atua nas ligações α -1,6 nas cadeias ramificadas.
Celulase	Hidrólise de Fibras	50-60	4,5-5,0	Reduz o tamanho da cadeia atuando nas ligações β -1,4 nas fibras de celulose
Protease	Hidrólise de proteínas	50-60	3,0-9,0	Favorece a hidrólise das proteínas garantindo melhor qualidade dos subprodutos.

Fonte: (Autores 2025 - Adaptada).

Diferentemente da cana, que possui açúcares fermentáveis como a sacarose (glicose + frutose), os componentes amiláceos precisam passar por um processo de hidrólise onde através da ação de enzimas, o amido é transformado em açúcares fermentáveis possibilitando o processo de fermentação das leveduras (LI; DUAN; WU, 2016; SILVA et al., 2022). Segundo Scipioni (2011), a hidrólise consiste na clivagem do polímero de amido em compostos de cadeia curta como maltose, dextrose e monômeros de glicose. Assim, ao sair do processo de moagem, o amido contido na farinha de milho necessita ser hidrolisado.

Segundo Cripwell et al. (2020), as enzimas usualmente utilizadas no processo de hidrólise são: α -amilases, β -amilases e a glucoamilase. O uso dessas três enzimas pode alcançar uma conversão total do amido, sendo 85% convertidos pelas amilases e o restante pela glucoamilase. A hidrólise é constituída basicamente de três etapas: gelatinização, liquefação e sacarificação (MACHADO; ABREU, 2006; LOPES et al., 2021).

A economia de produção de etanol é significativamente influenciada pelo custo dos seus insumos. Além de caras, as enzimas são extremamente sensíveis e, em razão disso, estratégias de recuperação e prolongamento do uso dessas enzimas estão atraindo a atenção de muitos pesquisadores. Uma das soluções muito estudadas é a imobilização de enzimas, que consiste na anexação de enzimas a um suporte inerte, facilitando sua recuperação e reutilização. Pesquisas como a de Baptista (2013) e Luchiari (2019) obtiveram resultados positivos na imobilização de enzimas para hidrólise do amido de milho.

A primeira etapa de hidrólise é chamada de gelatinização, mas também pode ser considerada como uma pré-hidrólise, pois precede à adição das enzimas. Nessa etapa, o farelo de milho proveniente da moagem do grão é misturado com água em excesso e cozinhado até a gelatinização completa dos grânulos, sendo a temperatura de gelatinização do amido de milho de aproximadamente 70 °C (SOUZA; ANDRADE, 2001). Entretanto, estudos como o de Xu et al. (2020) mostram que a temperatura pode variar, dependendo do tipo de grão, umidade e também da porcentagem de amilose presente no amido.

A gelatinização é realizada de modo a separar a amilose e a amilopectina presentes no amido, facilitando a ação da enzima α -amilase na etapa de liquefação. Os grânulos de amido são insolúveis em água fria, mas quando a mistura da farinha de amido com água é cozida, os grânulos de amido começam a adsorver a água e inchar. Segundo Hoover (2001), isso acontece devido à quebra das pontes de hidrogênio presentes entre as moléculas de amilose e amilopectina, permitindo assim a entrada de água dentro dos grânulos. A estrutura granular do amido é então rompida e a viscosidade é aumentada, formando a pasta de amido (KELSALL; LYONS, 2003; QUINTERO et al., 2008).

Nessa etapa de cozimento e gelatinização, o pH é ajustado adicionando-se ácido sulfúrico ou ácido clorídrico. Isso é necessário para que a pasta de amido tenha um ambiente propício à ação da α -amilase na etapa seguinte de liquefação, sendo o pH ótimo da α -amilase entre 5,0 e 6,0. (SIVARAMAKRISHNAN et al., 2007). Como demonstram os estudos de Gonçalves (2006), Carvalho et al. (2007) e Spier (2005), em que foram obtidas temperaturas ótimas entre 50 °C a 95 °C, a temperatura ótima da enzima α -amilase pode variar de acordo com a origem da enzima. Como as

temperaturas de hidrólise de amido de milho são elevadas, é necessária a utilização de enzimas termoestáveis que suportam temperaturas superiores a 90 °C.

Posteriormente à gelatinização, inicia-se a etapa de liquefação. Essa etapa consiste na adição da enzima α -amilase à pasta gelatinizada de amido de milho, transformando as moléculas de amilose e amilopectina em dextrinas e oligossacarídeos (BOTHAST; SCHLICHER, 2005). Segundo Kelsall e Lyons (2003), a dosagem da enzima é tipicamente entre 0,04% e 0,08% da massa da pasta a ser liquefeita, sendo a etapa de liquefação realizada sob agitação durante no mínimo 30 a 60 minutos. Esse tempo de residência pode ser ainda maior, aproximadamente 1,5 a 2 horas, uma vez que o tempo de reações catalisadas por enzimas é diretamente proporcional à concentração de enzimas utilizadas. Como as enzimas possuem um alto custo, é comum que indústrias aumentem o tempo de residência da etapa de liquefação para que as reações sejam realizadas com a dosagem mínima de enzimas. A etapa de liquefação diminui a viscosidade da solução através do uso de enzimas, agitação e temperaturas superiores a 95 °C, permitindo assim que a etapa de sacarificação possa ocorrer de forma facilitada (BOTT et al., 2018).

A última etapa de hidrólise do amido é chamada sacarificação. A solução liquefeita contendo dextrinas e oligossacarídeos é resfriada e seu pH é ajustado para que a sacarificação catalisada pela enzima glucoamilase seja realizada. Após a liquefação, a pasta de milho passa a se chamar “massa de milho” (MOSIER; KLEIN, 2020).

A enzima glucoamilase assim como a α -amilase possui pH e temperatura ótima de atividade, podendo também haver variações conforme o tipo ou origem da enzima. No caso da glucoamilase, a temperatura e pH precisam estar em faixas menores que as citadas para a α -amilase, sendo a temperatura ótima aproximadamente 60 a 65 °C e o pH entre 4,0 e 4,5 para a atividade da glucoamilase. Entretanto, como é desejado mitigar a presença de contaminações nessa etapa, são usualmente utilizadas enzimas termoestáveis que suportam temperaturas superiores. Sendo assim, glucoamilases com temperatura ótima de 75 °C são comumente utilizadas (KELSALL; LYONS, 2003; PAVEZZI, 2006).

Na sacarificação, as dextrinas são transformadas em moléculas de glicose, possibilitando assim o processo de fermentação e obtenção de etanol pelas leveduras. Esse processo leva geralmente entre 45 a 90 minutos, podendo chegar, em alguns

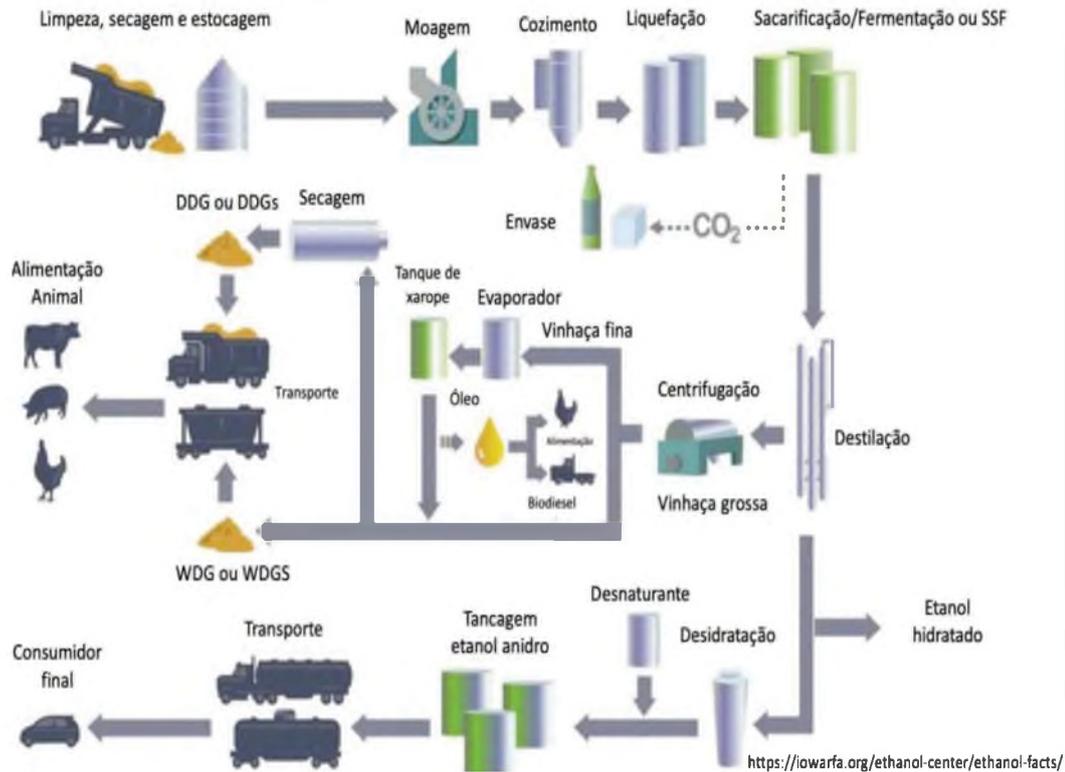
casos, a até 6 horas, e a quantidade de enzima adicionada é de 0,06-0,08% da massa a ser sacarificada. Após o processo de hidrólise, a massa de milho passa a se chamar mosto (KELSALL; LYONS, 2003).

Quando o processo é realizado da forma como foi descrita, onde a etapa de sacarificação é realizada previamente a fermentação, temos um modelo chamado de hidrólise enzimática de sacarificação e fermentação separada (SHF). Porém, temos também um outro modelo que muitas indústrias vêm utilizando, o SSF, onde a etapa de sacarificação e fermentação são realizadas de forma simultânea (VÁSQUEZ et al., 2007).

No modelo SSF, a sacarificação acontece juntamente com a fermentação nas dornas ou biorreatores de fermentação. Com isso, a glicose formada pela enzima glucoamilase é imediatamente consumida e convertida em etanol, podendo assim reduzir a inibição gerada pela abundância de substrato (glicose) (POWER, 2003). O que não acontece no SHF, onde toda a glicose produzida durante a sacarificação é transferida para os biorreatores, estando disponíveis para o consumo das leveduras assim que são adicionadas ao mosto.

Segundo Sanches e Cardona (2008), o processo SSF apresenta índices mais atrativos que o SHF, pois o rendimento da produção é maior e o consumo energético é menor. Estudos como o de Camporezi e Dias (2021), realizados no Brasil, também demonstram que o processo se SSF apresenta resultados positivos quanto ao rendimento de produção do etanol de milho. Além disso, pesquisas demonstram que no SSF o tempo de processo é menor, o que pode ser vantajoso, uma vez que o tempo para hidrólise e fermentação da indústria de etanol de milho é significativamente alto se comparados com a indústria de cana-de-açúcar (SANTOS; MAIOR; GOUVEIA, 2010). Entretanto, como as enzimas utilizadas possuem um alto custo para a indústria de etanol de milho, a possibilidade de operação em condições ideais para cada enzima é um dos grandes atrativos para o processo SHF. Na Figura 16, temos ilustrado o fluxograma simplificado da produção de etanol de milho utilizando a configuração SSF.

FIGURA 13 - Fluxograma simplificado processo SSF



Fonte: <https://iowarfa.org/ethanol-center/ethanol-facts/>

Em linhas gerais, o tipo de processo deve ser avaliado correlacionando os rendimentos obtidos ao final do processo juntamente com as matérias-primas utilizadas, consumo de utilidades e custos de manutenção, verificando o menor custo para maiores rendimentos.

4.2.3.2.4 Fermentação

O processo fermentativo consiste em um processo bioquímico anaeróbio, onde o etanol é produzido através do consumo de açúcares simples durante o processo metabólico de leveduras. A levedura mais utilizada nos processos fermentativos é a *Saccharomyces cerevisiae* (PARAPOULI et al., 2020). Segundo Vasconcelos (2010), essas leveduras precisam apresentar algumas características importantes para uma produção eficiente de etanol, como: resistência à acidez e temperaturas elevadas, elevada conversão de açúcares em etanol, estabilidade genética, baixa produção de

glicerol, tolerância a altas concentrações de substrato e de etanol de modo a evitar efeitos inibitórios.

A seleção de leveduras aumenta os rendimentos da produção de etanol na indústria, sendo assim, após anos de pesquisas, foram desenvolvidas cepas de leveduras que são amplamente utilizadas nas unidades sucroenergéticas brasileiras, dentre elas estão as leveduras. Dentre elas podemos citar as leveduras da NOVONESIS, pertencentes à família INNOVA®, que promove uma fermentação de alto rendimento por meio da expressão de enzimas maximizando a conversão do amido. Além da qualidade da levedura, outros fatores afetam o processo fermentativo, dentre estes se destacam: pH, temperatura, acidez, presença de microrganismos contaminantes, presença de sulfito, concentração de açúcares do meio, concentração de etanol e disponibilidade de nutrientes (MELO, 2006; SOUSA; MONTEIRO, 2012).

Segundo Russell (2003), podemos também representar o processo fermentativo de uma maneira mais simplificada, através da equação de Gay-Lussac:



Essa equação, nomeada em homenagem ao cientista francês Gay-Lussac, mostra que a glicose produz partes iguais de etanol e dióxido de carbono, além de produzir energia. A equação consiste basicamente em uma molécula de glicose e duas de fosfato e de ADP que são transformadas em duas moléculas de etanol, dióxido de carbono, ATP e água, sendo ADP e ATP compostos orgânicos responsáveis pelo fluxo de energia das células vivas. Como é uma reação simplificada, ela não mostra que parte do açúcar é usado no crescimento da levedura e que existem outros metabolitos produzidos por fermentação secundária, como glicerol, acetoina, acetaldeído, ácidos orgânicos, álcoois superiores, formação de biomassa, os quais são alguns exemplos de produtos secundários indesejados que reduzem o rendimento prático da fermentação (MUTTON, 2008; RUSSELL, 2003).

Estima-se que em operações industriais, deve-se almejar conversões de aproximadamente 90% do rendimento teórico, sendo os 10% de afastamento do valor teórico devido a fatores como a produção dos metabólitos, condições de

contaminação, possíveis inibições no processo fermentativo (CANHA, 2009; WALKER G.; WALKER R., 2018). Diversos estudos visam aumentar esses percentuais de rendimento, como exemplo o realizado por Ferreira et al. (2021) que demonstrou que a adição de suplementos nutricionais à base de nitrogênio e fósforo melhoram as condições de fermentação alcoólica nas usinas de etanol de milho.

Os processos fermentativos podem ocorrer de forma contínua ou descontínua (batelada). Na maioria das usinas sucroenergéticas brasileiras, o processo de fermentação ocorre em bateladas, sendo apenas os processos *upstream* (moagem e hidrólise) e *downstream* (destilação e recuperação) realizados continuamente. Desse modo, as instalações das usinas possuem geralmente uma série de biorreatores que se alternam durante a produção (MOSIER; KLEIN 2020). O motivo pela preferência por processos em batelada está diretamente relacionado com possíveis contaminações microbiológicas que podem reduzir significativamente o rendimento da produção (CNPEM, 2017).

Em usinas de cana-de-açúcar, no controle desses contaminantes é muito comum a utilização de diferentes tipos de antibióticos. Porém, em usinas de etanol de milho, o mais recomendado na literatura é o uso de antibióticos como a penicilina e virginiamicina (DAVE; KELSALL; LYONS, 2003). De acordo com a PROZYN BIOSOLUTIONS (2021), o cuidado com a escolha do antibiótico é devido à possibilidade de contaminação por antibióticos dos DDSs e WDGs, que são utilizados na ração animal e importantes coprodutos da produção de etanol de milho. A empresa ainda cita a possibilidade de utilização de antimicrobianos naturais, como de extratos derivados do lúpulo, como alternativa aos antibióticos.

Além dos antibióticos, o controle de contaminações nas indústrias é realizado através de um tratamento ácido, com a correção do pH do meio através da adição de ácido sulfúrico (MASSON, 2013). As leveduras são acidófilas e, em mostos industriais, os valores de pH geralmente possuem uma faixa de pH de 4,5 a 5,5 (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001). Com relação à temperatura ótima para as leveduras, temperaturas da ordem de 26-35 °C são favoráveis ao processamento de etanol, sendo 32°C a temperatura usual de muitas plantas brasileiras. É importante também salientar que a temperatura ótima pode variar dependendo da cepa de *Saccharomyces cerevisiae* utilizada no processo (CASTRO et al., 2015). Visto isso, é na etapa de fermentação que as leveduras são adicionadas às dornas de fermentação, onde está presente o

mosto contendo açúcares fermentescíveis provenientes das etapas anteriores de hidrólise do amido.

No Brasil, o sistema tradicional de produção de etanol é o sistema Melle-Boinot, que é um processo de batelada alimentada onde as leveduras são centrifugadas e tratadas ao final da fermentação, podendo ser reutilizadas em novos lotes de fermentação (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011). Entretanto, no processo de produção de etanol de milho, o fermento não pode ser separado do vinho fermentado, devido à natureza física do mosto de milho. Assim, após a fermentação, todo o vinho é enviado para a destilação, não havendo a separação das leveduras (BELLUCO; ALCARDE, 2008). Com isso, existe um grande custo na adição de novas leveduras a cada processo fermentativo. De acordo com Andrietta (2019) e Godoy (2019), é possível utilizar as células de leveduras excedentes do processo de etanol de cana, se estiverem em condições satisfatórias, no processo de produção de etanol de milho, aumentando assim a integração entre as usinas de etanol e cana. Essa prática pode reduzir os custos de produção nas indústrias do tipo Flex e Flex-Full.

Os tempos de fermentação na indústria de milho são muito superiores aos de cana-de-açúcar. Enquanto a fermentação do mosto da cana demora aproximadamente 10 a 12 horas, nas usinas de milho esse tempo de fermentação é de 38 a 45 horas (SOBRINHO, 2012). Podendo esse tempo ser ainda superior, como demonstra Secches et al. (2022), em uma pesquisa realizada sobre leveduras industriais brasileiras, onde apresentaram concentração máxima de etanol após 72 horas de fermentação. Além disso, na condição de altos sólidos, o tempo foi ainda maior, 96 horas para concentração máxima de etanol.

4.2.3.2.5 Destilação – Obtenção de Etanol e Coprodutos

Após sair do processo de fermentação, o mosto passa a se chamar vinho fermentado e é encaminhado para o processo de destilação. A destilação é bastante similar a realizada em processos à base de cana-de-açúcar, porém a quantidade de sólidos no vinho é superior. O etanol encontra-se homogeneamente misturado ao vinho fermentado, logo é necessário realizar um processo de separação através de colunas de destilação fracionada. O processo de destilação consiste basicamente em um processo de separação onde o vinho é aquecido e, levando em conta os diferentes pontos de ebulição da mistura, o componente de interesse é separado.

De acordo com Lopes et al. (2016), a concentração de etanol no vinho proveniente do processamento do milho é de 12-18% (v/v), sendo assim superior à de processos convencionais de cana-de-açúcar 7-12% (v/v). Na coluna de destilação, esse etanol presente no vinho é destilado, saindo no topo da coluna hidratado com um pouco de água que também foi volatizada. Essa mistura de vapores de etanol e água (45 a 50°GL), chamada flegma, é enviada para coluna de retificação, cujo objetivo é desidratar a mistura de etanol e água, obtendo assim etanol hidratado com teor alcoólico de 96%. A flegmaça, produto de fundo da coluna de retificação, pode ser recirculada no processo (CHIEPPE JUNIOR, 2012).

O restante dos componentes da mistura da primeira coluna forma o produto da base da coluna, denominado vinhaça bruta. No processamento do etanol de milho, essa vinhaça possui alta quantidade de sólidos em suspensão. Com isso, a vinhaça bruta passa por um processo de centrifugação, onde são separados a água residual de destilação (vinhaça fina) e os sólidos (torta úmida ou grãos de destilaria). A vinhaça fina é evaporada em evaporadores, sendo concentrada em xarope de milho, de onde parte do xarope é extraído o óleo de milho (MOSIER; KLEIN, 2020).

O xarope de milho é misturado com a torta úmida, podendo ser retirado nessa etapa do processo um dos coprodutos, o WDGs com umidade de aproximadamente 65%. Como o teor de umidade é elevado, ele precisa ser consumido mais rapidamente, de modo a evitar a degradação dos nutrientes e aparecimento de mofos. Sendo assim, o WDGs é normalmente comercializado para produtores rurais próximos às instalações da usina (BOTHAST; SCHLICHER, 2005; MALISZEWSKI, 2021).

Essa torta úmida combinada com xarope de milho também dá origem a um importante coproduto da indústria, o DDGs. Assim como o WDGs ele é utilizado na nutrição animal devido ao seu alto valor proteico, entretanto, para ser produzido, esse coproduto necessita passar por um processo de secagem, onde o produto final será comercializado com 10 a 12% de umidade. Por ter um valor de umidade inferior, ele pode ser mais facilmente armazenado e transportado, sendo assim uma opção mais viável na produção de grãos de destilaria da indústria do etanol de milho (GRIPPA, 2012; MALISZEWSKI, 2021).

O etanol, produto principal do processo, pode ser comercializado de duas formas. A primeira é o etanol hidratado proveniente da coluna de retificação com composição de 96 °GL. Outra forma é a produção do etanol anidro, com no mínimo

99,6% de graduação alcoólica. O etanol e a água formam uma mistura azeotrópica que dificulta a separação total por processos de destilação comuns. Com isso, são necessárias outras técnicas para a desidratação desse etanol hidratado obtido na coluna de retificação. Uma das opções muito utilizadas no Brasil é a destilação azeotrópica. Na destilação azeotrópica é introduzido um terceiro componente ao sistema, usualmente utilizando o cicloexano como solução arrastadora. Esse agente arrastador forma um azeótropo com ponto de ebulição mais baixo, permitindo com que a água seja removida (MACHADO; ABREU, 2006).

Outra opção na obtenção de etanol anidro é o uso de peneiras moleculares, processo muito utilizado nos EUA. Esse processo proporciona um menor consumo energético que a destilação azeotrópica, mas exige um alto investimento inicial. O processo consiste na utilização de peneiras preenchidas com zeólitas (material microporoso com alta capacidade de adsorção de água). Após a adsorção de água e obtenção do etanol anidro, as zeólitas passam por um processo de regeneração onde a água é removida de seus poros (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011). Além das duas técnicas já citadas, temos também a destilação extrativa, onde monoetilenoglicol (MEG) é utilizado como agente de separação. Esse tipo de destilação é semelhante à 28 destilação azeotrópica, porém nesse método o MEG, que é alimentado no topo da coluna, arrasta a água para o fundo da coluna. Os vapores de etanol saem pelo topo da coluna, sendo posteriormente condensados e armazenados em tanques (SANTOS et al., 2021).

4.2.3.2.6 Coprodutos

Além da produção de etanol hidratado e anidro, a produção de etanol a partir do milho possibilita a produção de coprodutos agroindustriais que podem ser amplamente utilizados na nutrição animal, fornecendo fontes de proteína para bovinos, aves e suínos. Os principais coprodutos da indústria são os DDG (Dried Distillers Grains – Grãos Secos de Destilaria), WDG (Wet Distillers Grains – Grãos Úmidos de Destilaria), DDGS (Distillers Grains with solubles – Grãos Secos de Destilaria com Solúveis), WDGS (Wet Distillers Grains with solubles – Grãos Úmidos de Destilaria com Solúveis) e óleo de milho. A diferença entre os grãos de destilaria e os grãos de destilaria com solúveis é a incorporação do xarope de milho em seu processamento.

Segundo Duarte, Mattoso e Garcia (2021), cerca de 70% da produção mundial de milho é destinada à alimentação animal, sendo que no Brasil esse valor varia entre 60 e 80%. Isso evidencia a importância dos grãos de destilaria como coprodutos da indústria de etanol de milho, sendo assim um potencial fonte de receita para a cadeia produtiva. O DDG é uma fonte competitiva de proteína, de acordo com dados de cotação de mercado realizados pela SCOT CONSULTORIA (2022), em dezembro de 31 2022 o preço médio da tonelada de DDG foi de R\$ 1.541,22, enquanto o de farelo de soja R\$2.540,56. O preço é um atrativo para os agropecuaristas brasileiros e, com o crescimento das indústrias de etanol de milho, a tendência é que a demanda aumente e esse coproduto se torne cada vez mais relevante no cenário brasileiro de nutrição animal. Além disso, de acordo com a UNEM (2022b), as exportações do DDGS estão em pleno crescimento. Estima-se que em 2022 foram exportados para um total de dez países, cerca de 400 mil toneladas do coproduto, e em 2023 o volume será ainda maior.

Segundo dados estimados pela SCOT CONSULTORIA (2022), na safra 2021/22 foram produzidas 3,1 milhões de toneladas de DDG e WDG, e para a próxima safra, 2022/23, a produção deverá atingir 3,5 milhões de toneladas. De acordo com Neves et al. (2021), a partir de 1000 toneladas de milho, podem ser processados aproximadamente 312 toneladas de DDGs e 12,5 toneladas de óleo de milho. Na Tabela 4, onde são mostrados valores aproximados das principais receitas de uma usina Full milho, é possível visualizar que o DDGS contribui com 13% da receita total, demonstrando assim a importância desse coproduto para a indústria.

TABELA 4 - Receita Produtos e Coprodutos

Produtos e coprodutos	Receita (%)
Etanol de milho	83%
Grãos de destilaria	13%
Óleo de milho	2%
Energia	1%
Outros	1%

Fonte: Adaptado de Neves et al. (2021).

Fonte: Adaptado de Neves et. Al. (2021).

O óleo de milho, outro importante coproduto, é geralmente comercializado para produção de biodiesel, fabricação de tintas e até mesmo como aditivo alimentar para aves e bovinos (SÃO MARTINHO, c2018), e o WDGS, como já citado, devido a sua maior perecibilidade é produzido em menores quantidades e comercializado com produtores próximos à planta produtiva.

4.2.4 Projeções do Mercado Brasileiro

Com a mobilização para a redução da pegada de carbono até 2030, incentivo do governo por aumento do teor de etanol na gasolina e alta tecnologia empregada no cultivo de milho, aliada as tecnologias das empresas fornecedoras de maquinário, a expansão do setor já é realidade.

FIGURA 14 - Biorrefinarias atuais e futuras

Um setor em expansão



Fonte: UNEM 2024.

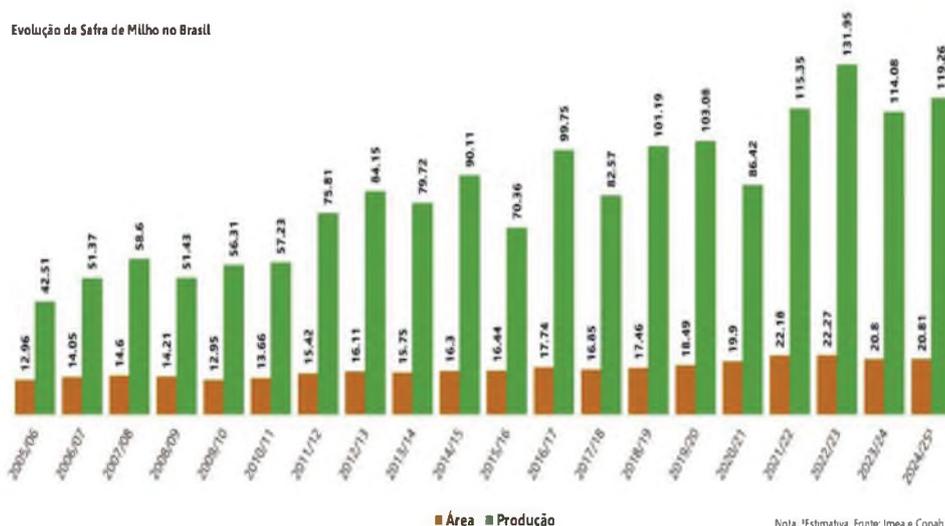
Em menos de 10 anos, a indústria de etanol de milho revolucionou a produção nacional de biocombustíveis, o setor de proteína animal e promoveu a valorização da produção de milho, promovendo a sustentabilidade e agregando valor ao agronegócio brasileiro. Atualmente, o Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos e da China (UNEM 2024).

Nos últimos 10 anos, a produção brasileira aumentou em 40%. A indústria do etanol de milho surge justamente para agregar valor sobre essa produção, utilizando os excedentes exportáveis como matéria-prima para produção de biocombustíveis e de DDG/DDGS, importantes componentes para nutrição animal (UNEM 2024).

FIGURA 15 - Evolução da produção de milho desde 2005

Evolução da área e produção de milho

Evolução da Safra de Milho no Brasil



Fonte: UNEM 2024

FIGURA 16 - Projeção futura produção de etanol de milho

Produção de etanol de milho no Brasil por tipo de produto

MILHÕES DE HMT*



Fonte: UNEM 2024

Com as novas fábricas de produção de etanol em operação, assim como o aumento da produção do milho, as projeções mostram que em 10 anos a produção vai dobrar. Consolidando o potencial das biorefinarias brasileiras.

5. APLICAÇÃO DO A3 NA ETAPA DE FERMENTAÇÃO

O modelo A3 que será utilizado foi customizado por uma empresa de biotecnologia localizada no município de Araucária-PR, o qual é usado amplamente quando aplicável.

Será realizada uma análise hipotética da fermentação típica de produção de etanol de milho via seca e com os processos de sacarificação e fermentação ocorrendo simultaneamente conforme explicado anteriormente. O caso será aplicado em uma biorrefinaria na qual a produção diária é de 1,77 milhões de litros de etanol hidratado por dia e processamento máximo de até 3940 toneladas de milho por dia. Todo o etanol produzido será disponibilizado nos postos de combustíveis brasileiros. O principal objetivo é aumentar em 1% a produção de Etanol por tonelada de milho processada, ou seja, aumentar a conversão dos açúcares em etanol. O A3 proposto contemplará os seguintes tópicos:

1. Problema/ Proposta de melhoria
2. Investigação
3. Meta (*Target*)
4. Análise de Causa Raiz (método Ishikawa)
5. Contramedidas
6. Experimentação
7. Implementação/ Contramedidas
8. *Follow up*
9. Ideias e compartilhamentos

5.1 PROPOSTA DE MELHORIA

O estudo de caso prevê um aumento no rendimento do processo de fermentação para aumento de 1% de volume de etanol hidratado por tonelada de milho processada.

Atualmente de acordo com a (UNEM 2024), conforme mostrado na figura 9, é possível produzir 440 L de etanol por tonelada (1 Ton) de milho processada. Com meta da ferramenta A3, a proposta é de obter 444 L de Etanol por tonelada de milho processada. O aumento de 4 L/ ton de milho processada é equivalente a 15.760 L extra produzidos por dia e podendo abastecer em torno de 315 automóveis com capacidade de tancagem de 50L com combustível renovável.

5.2 INVESTIGAÇÃO

A produção diária está em média de 439-440 L/Ton de milho e os valores podem ser aumentados de acordo com outras unidades da empresa.

Os processos anteriores a fermentação deverão ser investigados se estão de acordo com o plano de qualidade da empresa: processos de recebimento do milho, moagem, pré-hidrolise (gelatinização), liquefação, sacarificação. Para todas estas etapas, os dados de pelos menos dois anos devem ser levantados e comparados com o rendimento de fermentação no período, conforme descrito.

5.2.1 Processo de Recebimento e Estocagem

O histórico das regiões, fazendas, cooperativas de onde o milho foi colhido e as condições de estocagem de cada safra devem ser consideradas. Verificar dados de processo e cartas de controle de temperatura dos armazéns e controle de umidade.

5.2.2 Processo de moagem

O histórico da granulometria e geração de finos devem ser levantados, estes são fatores de extrema importância e, podem contribuir de 5 a 10 % no rendimento da

fermentação. Verificar dados de processo, cartas de controle de processo e dados de laboratório.

5.2.3 Gelatinização (Pré-Hidrólise)

Verificar os tempos e a curva de aquecimento da mistura de amido e água, assim como as proporções e ambos e as curvas de pH. Esse preparo correto do meio é determinante para a ação e eficiência das enzimas no processo posterior.

5.2.4 Liquefação

Verificar as cartas de controle de processo para temperatura, pH, quantidade e os lotes das enzimas α -amilase, β -amilases e verificar com o laboratório de controle de qualidade a eficiência da conversão do amido em dextrinas.

5.2.5 Sacarificação/ Fermentação

Verificar as cartas de controle de processo para temperatura, pH, quantidade e os lotes da enzima glucoamilase e leveduras e verificar com o laboratório de controle de qualidade a eficiência da conversão de glicose em etanol e glicerol. Verificar se houve contaminações do período.

O uso do analista de dados trabalhando com o engenheiro de processo ou especialista de produção é primordial desse levantamento. Um *GEMBA* ou *GO and SEE* também é de extrema importância.

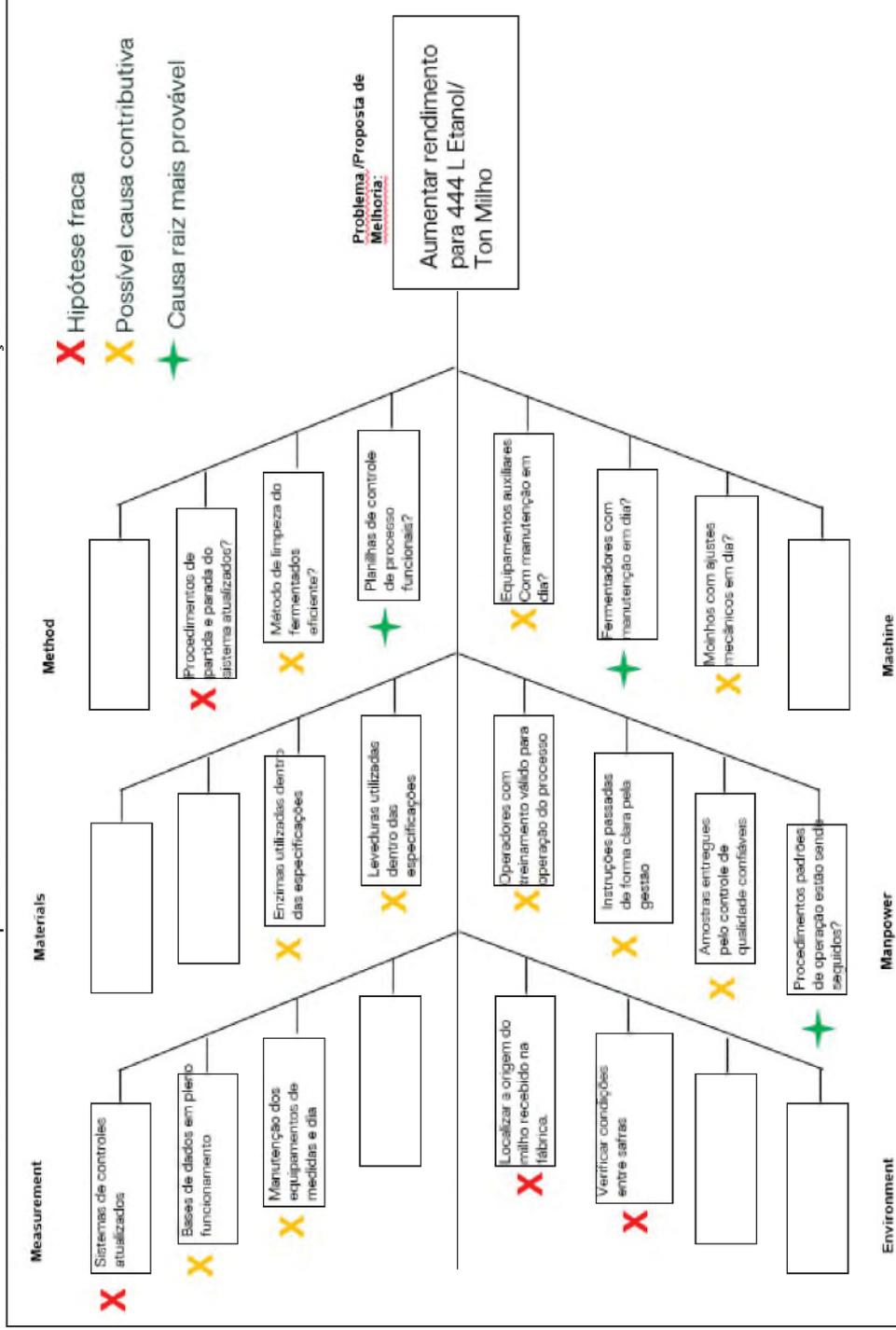
5.3 META

Aumentar o rendimento de fermentação de 440L Etanol/ Ton para 444L Etanol/ Ton até o 2º trimestre de 2026.

5.4 ANÁLISE DE CAUSA RAIZ

O método Ishikawa foi usado para levantar algumas hipóteses conforme abaixo.

FIGURA 17 - Ishikawa para Análise da Causa Raiz - Processo de Fermentação Etanol de Milho



Fonte: Autores (2025).

Os apontamentos devem ser considerados junto no plano de implementação de contramedidas.

5.5 CONTRAMEDIDAS

Garantir os processos e procedimentos atuais garantam os 440L Etanol/ Ton de milho. Garantir a estabilidade do processo para testes futuros e levantar os dados e fazer correlações dos últimos dois anos.

Também fazer um levantamento do plano de inspeção e manutenção de todos os equipamentos, desde a moagem até o fermentador. Contatar o fabricante dos equipamentos para uma auditoria visando um auxílio na otimização do processo com o sistema e condições atuais.

5.6 EXPERIMENTAÇÃO

Testar novas condições de processo, como mudança nos parâmetros como temperatura, pH, granulometria nas etapas do processo separadamente.

Busca junto a fornecedores novas enzimas e leveduras para serem testadas. Todos os testes devem ser cuidadosamente planejados para não haver sobreposição e risco para o processo.

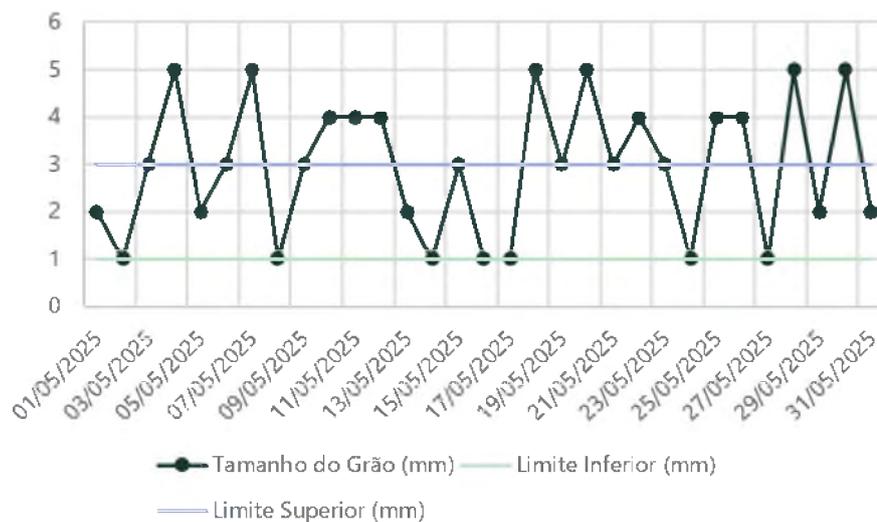
Novos KPI's (Key Performance Indicators) devem ser implementados para acompanhamento e com média diária para otimização e rastreabilidade do processo. KPI's que contribuem diretamente no rendimento para a produção de etanol desde a moagem até a etapa de fermentação, estão sendo considerados.

Os dados dos gráficos foram simulados, no entanto tais parâmetros devem ser cuidadosamente monitorados.

Moagem: Para o processo de moagem, a granulometria tem que atender os limites de 1 e 3mm para que durante o processo de liquefação a enzima α -amilases, β -amilases possam ter maior eficiência.

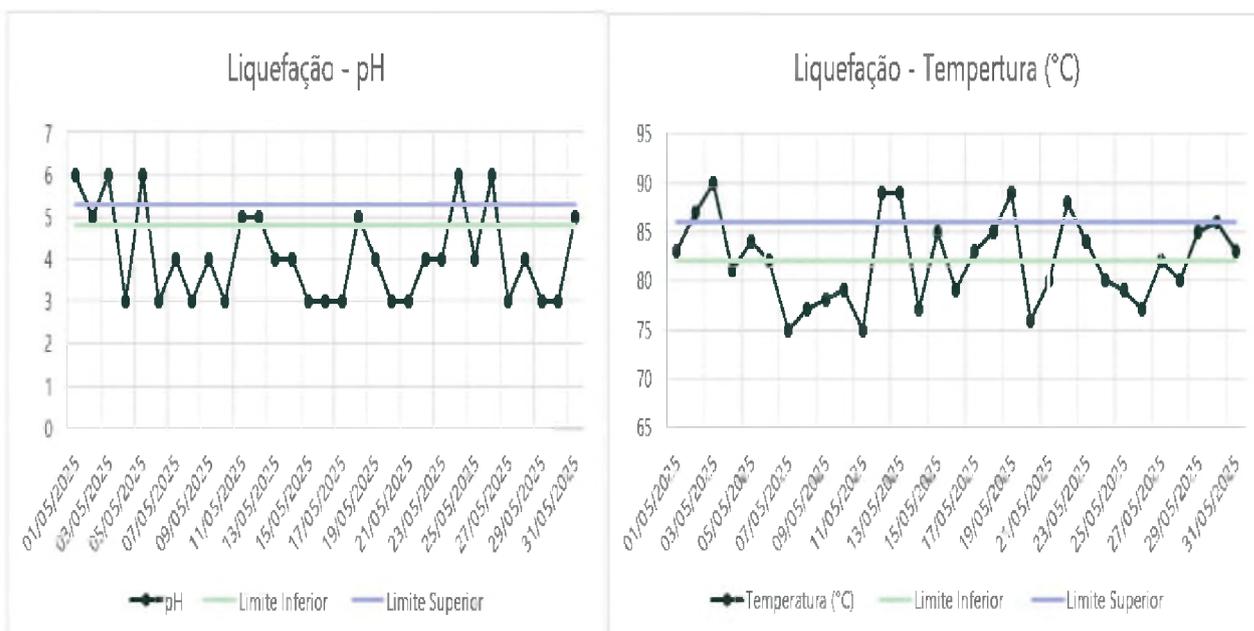
GRÁFICO 3 - KPI para Granulometria.

Granulometria Média - Diária



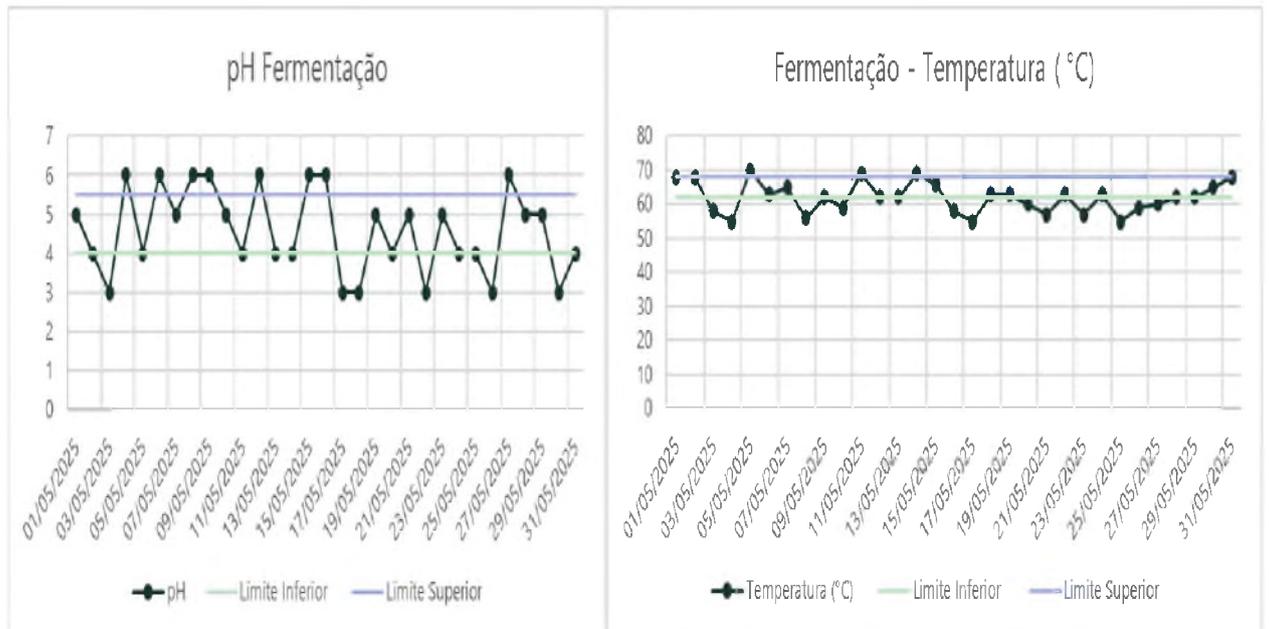
Liquefação: Processo que as α -amilases, β -amilases apresentam maior eficiência se estiverem sob condições ótimas, com ranges de pH 4,8-5,3 e temperatura 82-86°C.

GRÁFICO 4 - KPI monitoramento pH e temperatura - Liquefação



Sacarificação/ Fermentação: Processo em que as glucoamilases e leveduras apresentam maior eficiência se estiverem sob condições ótimas, com ranges de pH 4-5,5 e temperatura 62-68°C.

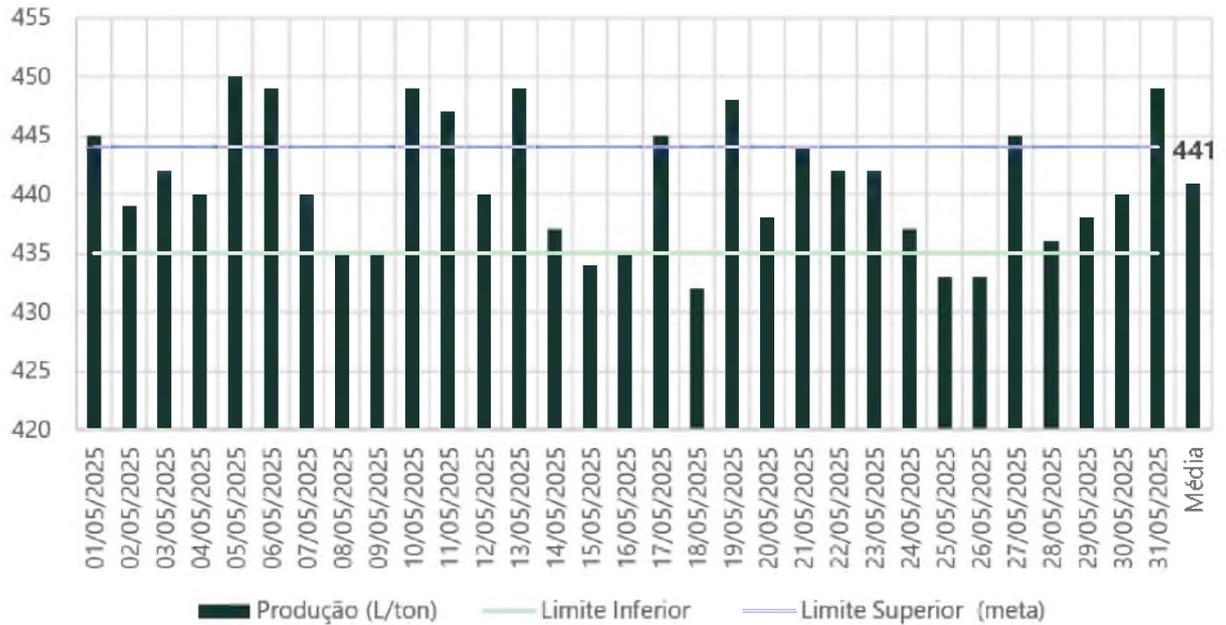
GRÁFICO 5 - KPI monitoramento pH e temperatura - Fermentação



Produção Diária: KPI que evidencia o desempenho do processo e reflete as ações tomadas para melhorias foram efetivas. Também refletem eventuais problemas como a quebra de um equipamento crítico, uma queda de energia inesperada na planta, um desvio acentuado do processo. Definidos limites inferiores de 435 e a meta em 444 L/ton de milho e a importância de se mostrar a média de produção no período em questão. Com estes dados é possível verificar dia a dia a produção total assim como a média de produção mensal.

GRÁFICO 6 - Produção Diária de Etanol

Produção Diária (L Etanol/ ton Milho)



5.7 IMPLEMENTAÇÃO/CONTRAMEDIDAS

As ações que devem ser executadas para garantir o andamento da ferramenta.

TABELA 5 - Ações Propostas

Contramedida	Responsável	Prazo	Status
Levantamento de dados do processo dos últimos 2 anos para todas as etapas de até a fermentação.	Analista de dados/ Engenheiro de processo	8 semanas	
Levantamento dos planos de inspeção dos equipamentos	Engenheiro de manutenção/confiabilidade	4 semanas	
Atualização das manutenções preventivas e corretivas	Engenheiro de manutenção/confiabilidade	1 semana	
Atualização dos sistemas de controle a armazenamento de dados	Engenheiro de automação	2 semanas	

Verificação da origem do milho recebido nos últimos dois anos	Equipe de logística	4 semanas	
Verificação dos procedimentos padrão de operação e planilhas de processo	Engenheiro de Processo/ Especialista de processo	2 semanas	
Verificação do histórico dos dados de laboratório de controle de qualidade	Engenheiro de Processo/ Engenheiro da Qualidade	3 semanas	
Verificação dos lotes de leveduras e enzimas utilizados no processo	Engenheiro de processo	1 semana	
Contratar empresa de tecnologia para auditoria na planta	Engenheiro de processo	4 semanas	
Fazer <i>benchmarking</i> com outras unidades do grupo	Especialista de Processo/ engenheiro de Processo	2 semanas	
Buscar novos fornecedores de leveduras e enzimas	Departamentos de compras	2 semanas	
Conferir notas de manutenção abertas no sistema	Analista de manutenção	1 semana	
Fazer <i>follow up</i> das ações	Especialista <i>Lean e Discussão dos KPI's</i>	A cada 3 semanas	

Fonte: Autores (2025).

O status deve ser atualizado pelo responsável pela ação conforme as atividades são executadas.

5.8 FOLLOW UP

A cada 3 semanas, uma reunião de acompanhamento das ações e definições de próximos passos devem ser realizadas pelo especialista *lean* ou líder do projeto de melhoria. Todos os dados devem estar disponíveis em plataformas de compartilhamento para acesso dos envolvidos no projeto.

5.9 INSIGHTS E SHARINGS

Após a primeira e demais reuniões, é importante falar sobre os seguintes tópicos:

O que funcionou bem?

O que ajudou?

O que não funcionou bem?

O que impediu a ação de ser feita?

Estas discussões são essenciais para que a equipe possa ajudar e trazer dificuldades durante a execução das tarefas.

Abaixo o A3 customizado, o qual deve ser atualizado ao longo do projeto.

FIGURA 18 - A3 - Aumentar Rendimento da Fermentação Etanol de Milho

A3	Lider	Esp Lean	Date	11 Maio 25	Week #
TOOL		Membros Equipe			
AUMENTAR RENDIMENTO FERMENTAÇÃO					
Eng Process, automação, Manutenção, compras					

<p>1. Problema</p> <p>O estudo de caso prevê um aumento no rendimento do processo de fermentação de milho de 1% a 2% e isso não está ocorrendo no final do processo.</p>	<p>2. Investigação</p> <p>O rendimento de fermentação está em torno de 80%. Resultado que precisa ser melhorado de acordo com todos os dados de entrada.</p> <p>Pré-condições de entrada e saída: O ciclo de vida da célula, a temperatura de ebulição do milho e o tipo de colheita de milho são os dados de entrada. O rendimento de fermentação é o resultado da fermentação.</p> <p>Pré-condições de saída: O rendimento de fermentação é o resultado da fermentação.</p> <p>Pré-condições de saída: O rendimento de fermentação é o resultado da fermentação.</p>	<p>3. Mapa</p> <p>Alvo: 82% Atual: 80%</p>	<p>4. Contradições</p> <p>Quanto mais produtividade, mais rápido que giram os 80% de rendimento. Quanto mais produtividade, mais rápido que giram os 80% de rendimento.</p> <p>Quanto mais produtividade, mais rápido que giram os 80% de rendimento.</p>
<p>5. Problema</p> <p>O estudo de caso prevê um aumento no rendimento do processo de fermentação de milho de 1% a 2% e isso não está ocorrendo no final do processo.</p>	<p>6. Contradições</p> <p>Quanto mais produtividade, mais rápido que giram os 80% de rendimento. Quanto mais produtividade, mais rápido que giram os 80% de rendimento.</p> <p>Quanto mais produtividade, mais rápido que giram os 80% de rendimento.</p>	<p>7. Mapa</p> <p>Alvo: 82% Atual: 80%</p>	<p>8. Contradições</p> <p>Quanto mais produtividade, mais rápido que giram os 80% de rendimento. Quanto mais produtividade, mais rápido que giram os 80% de rendimento.</p> <p>Quanto mais produtividade, mais rápido que giram os 80% de rendimento.</p>

Fonte: Autores (2025).

6. CONCLUSÃO

Diante de um mercado cada vez mais competitivo e dinâmico, especialmente no contexto da crescente produção de etanol de milho no Brasil, torna-se imprescindível que as empresas do setor adotem estratégias de gestão que promovam a eficiência operacional, a eliminação de desperdícios e a melhoria contínua. Nesse cenário, a filosofia Lean Manufacturing configura-se como uma abordagem essencial, ao proporcionar a reestruturação de processos produtivos com foco na geração de valor e na redução sistemática de perdas.

O Método A3, uma das principais ferramentas do Lean, demonstra-se eficaz na condução estruturada da resolução de problemas, como ilustrado na análise da etapa de fermentação da produção de etanol de milho. Sua aplicação permite a identificação de causas raiz, o planejamento de contramedidas e o acompanhamento de resultados com base em critérios objetivos.

Entretanto, a efetividade da implementação do Lean Manufacturing não se restringe à adoção de ferramentas isoladas. É fundamental o comprometimento da alta gestão e o fortalecimento de uma cultura organizacional voltada à melhoria contínua, ao aprendizado coletivo e ao engajamento dos colaboradores em todos os níveis. A liderança tem papel determinante na consolidação dessa cultura, garantindo a adaptação das práticas Lean à realidade específica de cada organização.

Adicionalmente, a tomada de decisão orientada por dados se mostra indispensável nesse processo. Os Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) desempenham uma função estratégica ao fornecer informações mensuráveis, que subsidiam o diagnóstico de falhas, o monitoramento de variáveis críticas e a avaliação da eficácia das ações implementadas. Dessa forma, os KPIs não apenas viabilizam a tradução dos princípios do Lean em resultados concretos, como também sustentam decisões mais precisas e alinhadas aos objetivos de melhoria.

7. REFERÊNCIAS

AFDC - **Alternative Fuels Data Center**. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/data/10331>, 2025.

ANP. **AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis>

BERTI, D. M. **IMPLANTAÇÃO DE UM MES (SISTEMA DE EXECUÇÃO DE MANUFATURA) EM UM AMBIENTE DE MANUFATURA ENXUTA**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2010.

BIRRU, E.; ERLICH, C.; BEYENE, G. B.; MARTIN, A. **Upgrading of a traditional sugar cane mill to a modern mill and assessing the potential of energy saving during steady state and transient conditions—part II: models for a modified cogeneration unit**. Biomass Conversion and Biorefinery, v. 6, n. 2, p. 233-245, 2016. CNI. Sondagem especial / Confederação Nacional da Indústria. Confederação Nacional da Indústria. Brasília, p. 7. 2019.

CARVALHO, J. D.; SOUSA, R. M. **Melhoria Contínua nas Organizações**. Lidel-Edições Técnicas, Lda, 2021.

FERREIRA, T.; DIAS, T. F. **Os Desafios na Implantação do Planejamento Estratégico em Empresas Vinculadas a uma Associação Privada de Parobé/RS**. Revista de Administração de Empresas Eletrônica-RAEE, n. 11, p. 201-228, 2019.

FERREIRA, F. N. A.; FERREIRA, W. M.; MOTA, K. C. D. N.; SILVA NETA, C. S., LARA, L. B.; SANTOS, E. A. D. **Avaliação nutricional do bagaço de cana-de-açúcar enriquecido com vinhaça em dietas para coelhos em crescimento**. Revista Caatinga, v. 28, p. 217-226, 2015.

FOGLIATO, F.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Elsevier Brasil, 2009.

GALHARDI, A. C.; SOUZA R. O. **O Lean Manufacturing na otimização de processos produtivos**. Brazilian Journal of Development, 2022. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/44983>. Acesso em: 10/05/2025.

HOLTSKOG. **Continuous Improvement beyond the Lean understanding**. Procedia CIRP, Gjøvik, Norway, 2013. 575 – 579.

IEA. **INFORMAÇÕES ESTATÍSTICAS DA AGRICULTURA**. Anuário IEA, 2009-2012. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/publicacoes/anuario.php>

IKEZIRI, et al. **A perspectiva da indústria 4.0 sobre a filosofia de gestão Lean Manufacturing**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, p. 1274- 1289, 09 janeiro 2020.

IMEA – Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. Disponível em: <https://www.imea.com.br/imea-site/>. Acesso em: 14/05/2025.

IMEA - INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA. Disponível em: <https://www.imea.com.br/imea-site/dashboards?c=3&d=1136864451708788736>. Acesso em: 14/05/2025.

INGLEDEW, W. M. **Ethanol fuel production: Yeast processes**. Encyclopedia of Industrial Biotechnology: Bioprocess, Bioseparation, and Cell Technology, p. 1-14, 2009.

INTARAMAS, K. et al. **Sequential catalytic-mixed-milling and thermohydrolysis of cassava starch improved ethanol fermentation**. Food and bioproducts processing. v.114, p. 72-84, 2019.

JÚNIOR, A. N.; OLIVEIRA, M. C. **A gestão da qualidade nas organizações: suas práticas, fatores de sucesso e tendências associadas às características culturais das empresas**. ENEGEP 2016.

KONISHI, I. C. S. F.; LOPES, J. A.; PESCUOMO, L. O. B. **Aplicação das Ferramentas de Gestão da Qualidade no Processo Produtivo do Etanol: Um Estudo de Caso**. Revista Multidisciplinar. Faculdade do Noroeste de Minas. HUMANIDADES & TECNOLOGIA EM REVISTA (FINOM) - ISSN: 1809-1628. Ano XIII, vol. 18- Jan-Dez 2019. Disponível em: https://revistas.icesp.br/index.php/FINOM_Humanidade_Tecnologia/article/view/810. Acesso em: 10/05/2025.

LEVINE, M. D.; MARK, L. B.; STEPHAN, D. **Estatística: teoria e aplicações usando Microsoft Excel em português**. Tradução: SOUZA, T. C. P. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2000.

LIMA, Y. C. C. et al. **Lean Constructione P+L como ferramenta de gestão da qualidade na construção civil: uma estratégia competitiva**. XXXIV ENEGEP- Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2014, Curitiba. Anais... Curitiba: ABEPRO, 2014

LINGOPASS. **Brasil é o 2º maior produtor de etanol combustível do mundo**. Disponível em: <https://www.lingopass.com.br/blog/o-brasil-e-o-segundo-maior-produtor-de-etanol-combustivel-do-mundo>. Acesso em: 14/05/2025.

MARIANO, E. B. **Conceitos Básicos de Análise de Eficiência Produtiva**. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 14., 2007, São Paulo. Anais. São Paulo: UNESP, 2007, p. 1-12.

MATA-LIMA, H. **Aplicação de ferramentas da gestão da qualidade e ambiente na resolução de problemas**. Apontamentos da Disciplina de Sustentabilidade e Impactes Ambientais. Universidade da Madeira (Portugal), 2007.

MELO, D. M. **Diagnóstico e Proposta de Melhoria do Desempenho do**
MELTON, T. THE BENEFITS OF LEAN MANUFACTURING. Chemical Engineering, 2005.

MILANEZ, A. Y. et al. **A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política**.

Revista do BNDES, Rio de Janeiro, n. 41, p. 147-207, jun. 2014.

MIGUEL, P.A.C. **Qualidade: enfoques e ferramentas**. São Paulo: Artliber, 2006.

NASS, L. L.; ELLIS D.; PEREIRA P. A. A. **Biofuels in Brazil: Na Overview**. Crop Science, 2007. Disponível em:

<https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2135/cropsci2007.03.0166>. Acesso: 10/05/2025.

NEVES, M. F. et al. **Etanol de Milho: cenário atual e perspectivas para a cadeia no Brasil**. 1. ed. Ribeirão Preto: UNEM, 2021. 115 p. Disponível em: <https://www.sna.agr.br/wp-content/uploads/2021/05/Etanol-de-Milho-no-Brasil-Fava-Neves-et-al-2021_compressed.pdf>. Acesso em: 13/05/2025.

NICHOLAS, **Lean Production for Competitive Advantage - A Comprehensive Guide to Lean Methods and Management Practices**. 2. ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2018.

NOGUEIRA, M. A. F. S.; GARCIA, M. S. **Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, p. 3275-3283, 2013.

OLIVEIRA, B. C.; MIRALES, E. **Princípios da Gestão da Qualidade: um estudo em uma Indústria do setor de purificação de água do estado do Paraná**. Ciências Sociais Aplicadas em Revista, v. 23, n. 43, p. 237-266, 2022.

PACHECO, D. A. D. J. **Teoria das Restrições, Lean Manufacturing e Seis Sigma: limites e possibilidades de integração**. Production, Porto Alegre, v. 24, p. 940-956, 2014.

Processo Produtivo de Etanol em uma Usina da Paraíba. Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/27047/1/TCC%20-%20Daniel%20Mororo.pdf>. Acesso em: 10/05/2025.

RAMIREZ, Caroline Moura et al. **Melhoria contínua de processos sob a ótica da saúde pública e do requisito regulatório: estudo de caso produção do insumo farmacêutico ativo da vacina de febre amarela atenuada**. 2022. Tese de Doutorado.

RANGEL, D. A.; FREITAS, L. M.; ASSIS II, O. R.; RÉGO, T. **Aumento da Eficiência Produtiva através da Redução do Tempo de Setup: aplicando a troca rápida de ferramentas em uma empresa do setor de bebidas.** P&D em Engenharia de Produção, Itajubá, v. 10, n. 1, p. 36-49, 2012.

RFA (2021) **Essential Energy - 2021 pocket guide to Ethanol.** Renewable Fuels Association. Disponível em: <https://d35t1syewk4d42.cloudfront.net/file/276/2021-Pocket-Guide.pdf>. Acesso em: 10/05/2025.

RODRIGUES, A. F.; FERRARIN, F. V.; OLESKO, P. G. M. **Implementação de indicador de desempenho OEE em máquina de abastecimento de ar condicionado automotivo.** 2013. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SANTOS, M. S. M. et al. **Energy Cultures and Sustainability in Biofuel Production.** Revista de agricultura neotropical, Cassilândia, v. 9, n.1, p. 1-8, 2022.

SCHEITERLE, L.; ULMER, A.; BIRNER, R.; PYKA, A. **From commodity-based value chains to biomass-based value webs: The case of sugarcane in Brazil's bioeconomy.** Journal of Cleaner Production, v. 172, p. 3851-3863, 2018.

SCHETTINI, D. C. D. **Eficiência Produtiva da Indústria de Transformação nas Regiões Brasileiras: uma análise de fronteiras estocásticas e cadeias espaciais de Markov.** 2010. 198 f. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILALERTRUKSA, T.; PONGPAT, P.; GHEEWALA, S. H. **Life cycle assessment for enhancing environmental sustainability of sugarcane biorefinery in Thailand.** Journal of Cleaner Production, v. 140, p. 906-913, 2017.

STEFANI, E. et al. **Applicability of Lean Philosophy in Industry 4.0.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 21335-21348, março 2021. ISSN 2525-8761.

TEIXEIRA, R. L. et al. **Os discursos acerca dos desafios da siderurgia na indústria 4.0 no Brasil.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 12, p. 28290-28309, dezembro 2019. ISSN 2525-8761.

TOLEDO, J. C. **Conceitos básicos de qualidade de produto.** In: BATALHA, M.O. Gestão Agroindustrial. São Paulo: Atlas, 2001.

UNEM – UNIÃO NACIONAL DO MILHO. Disponível em: <https://etanoldemilho.com.br/>. Acesso em: 15/05/2025.

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia. **Produção de etanol ultrapassa 32 bilhões de litros.** 15/01/2025. Disponível em:

<https://unica.com.br/noticias/producao-de-etanol-ultrapassa-32-bilhoes-de-litros/>. Acesso em: 15/05/2025.

[FS recebe autorização da ANP para operar sua terceira usina de etanol de milho](#)
Acesso em 15/05/2025

WANG, M.; HAN, J.; DUNN, J. B.; CAI, H.; Elgowainy, A. **Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use**. Environmental research letters, v. 7, n.4, p. 045905. 2012.

WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1995.

Proposta de implementação do Lean Manufacturing em uma multinacional de bioenergia: um estudo de caso. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: [Repositório Institucional - Universidade Federal de Uberlândia: Proposta de implementação do Lean Manufacturing em uma multinacional de bioenergia: um estudo de caso](#) Acesso em: 10/05/2025.