

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Eric Maik Teodoro Pereira

Lean Manufacturing aplicado à Manutenção: uma revisão bibliográfica

Betim
2025

ERIC MAIK TEODORO PEREIRA

**LEAN MANUFACTURING APLICADO À MANUTENÇÃO: uma revisão
bibliográfica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Flávio Magno de
Carvalho Fonseca

Betim

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

P436l Pereira, Eric Maik Teodoro

Lean Manufacturing aplicado à manutenção: uma revisão bibliográfica / Eric Maik Teodoro Pereira. – 2025.

59 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fonseca

1. Manutenção industrial. 2. Lean Manufacturing. 3. Eficiência operacional. 4. Linhas de produção. 5. Engenharia Mecânica. I. Pereira, Eric Maik Teodoro. II. Título.

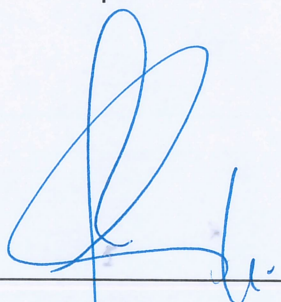
CDU: 658.58

Eric Maik Teodoro Pereira

LEAN MANUFACTURING APLICADO A MANUTENÇÃO: uma revisão bibliográfica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

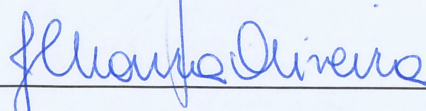
Aprovado em: 19 / 08 / 2025 pela banca examinadora:



Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fonseca (Orientador) – IFMG Campus Betim



Prof. Dr. André Fonseca Félix – IFMG Campus Betim



Prof.ª. Me. Jaqueline das Graças Moura Oliveira – IFMG Campus Betim

À minha mãe, que me ensinou a contar nos dedos;
Ao meu pai, que me ensinou a fazer conta de cabeça;
À minha madrinha, que me ensinou a contar com Deus;
E à minha família e amigos, que são com quem eu conto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida.

Agradeço à minha mãe, Monica, pelos milhares de quilômetros que caminhou para ir me levar e buscar na escola, pela ajuda prestada nos deveres de casa e pelo exemplo de sempre buscar evoluir por meio da educação. Obrigado por nunca me deixar faltar nada, mesmo acumulando, simultaneamente, os papéis de professora, aluna, dona de casa e, acima de tudo, mãe. Você é a minha inspiração.

Agradeço ao meu pai, Elcio, que, mesmo tendo interrompido os estudos ainda criança para trabalhar na roça, me criou com uma sabedoria rara. Obrigado por, mesmo após longos e cansativos dias de trabalho na indústria, dedicar parte do seu tempo de descanso em um pequeno quadro negro, ensinando-me a ler e a realizar as primeiras operações matemáticas. O senhor é o meu exemplo, quero ser como você.

À minha esposa, Carolina, por todos os momentos vividos durante essa graduação, por sempre estar ao meu lado e ser o meu porto seguro. Obrigado por me demonstrar, com sua força, que não podemos desistir dos nossos sonhos, independentemente dos desafios encontrados ao longo do caminho. Sou grato por sempre estar presente e por me dar o melhor presente do mundo, eu te amo.

À minha filha, Helena, que chegou na metade desta graduação, me fazendo ter várias dúvidas e incertezas sobre o meu futuro. Na verdade, você me trouxe resiliência e motivos para seguir em frente. Cada noite em claro tentando fazê-la dormir reforçou em mim a certeza de que a razão da minha existência é criá-la e amá-la incondicionalmente, tudo isso é por você. Papai te ama, minha princesa.

À minha pequena irmã, Elisa, com sua curiosidade e vontade de aprender, tenho certeza de que irá longe. Continue trilhando esse caminho com determinação.

Ao IFMG Betim, que desde 2017, se tornou a minha segunda casa, entrei como um menino e saí como um homem. Aos mais de 50 docentes que participaram da minha formação nesses oito anos, do Técnico à Engenharia Mecânica. Aqui conheci ensino de qualidade, valores, meus melhores amigos e a minha esposa.

Ao Clube Atlético Mineiro, que está presente em minha vida desde quando me entendo por gente, nas horas boas e ruins, sigo torcendo contra o vento.

Por fim, registro minha gratidão a todos que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste projeto, tornando possível a concretização deste objetivo.

“A excelência não é um ato, mas um hábito.”
Aristóteles

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a aplicação dos princípios do *Lean Manufacturing* na gestão da manutenção industrial. A crescente demanda por eficiência e competitividade nas organizações tem levado muitas empresas a reavaliarem seus modelos tradicionais de manutenção, geralmente baseados em ações corretivas ou preventivas com baixa previsibilidade e elevado custo. Nesse contexto, a filosofia Lean, que visa a eliminação sistemática de desperdícios e a potencialização do valor agregado, surge como alternativa promissora para transformar a manutenção em um processo mais estratégico e eficiente. A pesquisa fundamenta-se na análise de literatura técnica e científica publicada entre 1980 e 2025, abrangendo autores clássicos e estudos de caso relevantes. Foram abordadas as principais modalidades de manutenção — corretiva, preventiva e preditiva — e discutidas ferramentas essenciais do Lean, como o TPM (Total Productive Maintenance), OEE (Overall Equipment Effectiveness), Kanban, Just in Time e 5S. Os resultados indicam que a aplicação dessas ferramentas pode gerar reduções significativas no tempo de inatividade dos equipamentos, aumento da disponibilidade operacional e redução de custos diretos e indiretos. Além disso, foi identificado que a implementação bem-sucedida do Lean na manutenção contribui para mudanças positivas na cultura organizacional, promovendo o engajamento dos colaboradores e a melhoria contínua dos processos. Conclui-se que a aplicação do *Lean Manufacturing* na manutenção industrial é uma estratégia viável, com impactos significativos na produtividade e sustentabilidade das empresas, sendo especialmente relevante em um cenário industrial cada vez mais dinâmico e tecnológico.

Palavras-chave: *Lean Manufacturing*; Manutenção Industrial; TPM; OEE; Eficiência Operacional.

ABSTRACT

This work presents a literature review on the application of Lean Manufacturing principles in industrial maintenance management. The growing demand for efficiency and competitiveness has led companies to reconsider traditional maintenance strategies, which are often reactive, costly, and lack predictive capabilities. In this scenario, Lean Manufacturing — a philosophy that seeks the systematic elimination of waste and maximization of value — emerges as a promising approach to transforming maintenance into a more strategic and effective process. The research is based on the analysis of technical and scientific literature published between 1980 and 2025, encompassing both classical authors and recent case studies. The study explores the main types of maintenance — corrective, preventive, and predictive — and discusses essential Lean tools such as Total Productive Maintenance (TPM), Overall Equipment Effectiveness (OEE), Kanban, Just in Time (JIT), and 5S. The findings indicate that the implementation of Lean tools in maintenance activities can significantly reduce downtime, increase equipment availability, and lower both direct and indirect operational costs. Furthermore, the successful adoption of Lean principles contributes to cultural transformation, fostering employee engagement and a continuous improvement mindset throughout the organization. It is concluded that applying Lean Manufacturing to industrial maintenance is a viable and strategic solution, with significant impact on productivity, cost reduction, and organizational sustainability. This approach is especially relevant in an increasingly dynamic and technology-driven industrial environment.

Keywords: Lean Manufacturing; Industrial Maintenance; TPM; OEE; Operational Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Evolução dos tipos de manutenção..... | 20 |
| Figura 2 – Pilares do TPM..... | 25 |
| Figura 3 - Os sete desperdícios (<i>muda</i>) do Sistema Toyota de Produção. | 27 |
| Figura 4 - Princípios de Melhoria do <i>Lean Manufacturing</i> atualmente..... | 28 |
| Figura 5 - Bases, conceitos e pilares do Lean..... | 29 |
| Figura 6 - Componentes da Eficiência Global dos Equipamentos (OEE)..... | 32 |
| Figura 7 - Linha do tempo das revoluções industriais. | 33 |
| Figura 8 - Fluxograma de representação da seleção de artigos..... | 38 |
| Figura 9 - Princípios Lean na Manutenção..... | 40 |
| Figura 10 - Diagrama de Ishikawa da Mesa Bottero-M250. | 45 |
| Figura 11 – Fluxograma do Plano de Manutenção Mesa Bottero-M250. | 47 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Comparativo de tempo de inatividade. | 42 |
| Gráfico 2 - Comparativo de custos de manutenção. | 43 |
| Gráfico 3 - Comparativo de disponibilidade..... | 43 |
| Gráfico 4 - Comparativo consolidado dos estudos de caso. | 44 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Vantagens e desafios da aplicação do Lean Manufacturing na Manutenção Industrial | 48 |
|---|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Matriz GUT da Mesa Bottero-M250. | 46 |
|---|----|

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LM – *Lean Manufacturing*

TPM - Total Productive Maintenance (Manutenção Produtiva Total)

JIT – Just In Time

OEE - Overall Equipment Effectiveness (Eficiência Geral do Equipamento)

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

NBR - Normas Técnicas Brasileiras

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | Justificativa..... | 16 |
| 1.2 | Objetivos | 18 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 18 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos..... | 18 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 19 |
| 2.1 | Manutenção | 19 |
| 2.2 | Manutenção Corretiva..... | 21 |
| 2.3 | Manutenção Preventiva | 22 |
| 2.4 | Manutenção Preditiva | 23 |
| 2.5 | Manutenção Produtiva Total (TPM) | 24 |
| 2.6 | Lean Manufacturing | 26 |
| 2.7 | Overall Equipment Effectiveness (OEE)..... | 31 |
| 2.8 | Industria 4.0 | 33 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 36 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 39 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 50 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 52 |
| 7 | APÊNDICE – CARTILHA DE APOIO A IMPLEMENTAÇÃO DO <i>LEAN MANUFACTURING</i> APLICADO À MANUTENÇÃO INDRUSTRIAL..... | 58 |

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a competitividade no mercado industrial tem exigido das empresas não apenas a melhoria contínua de seus processos produtivos, mas também a eficiência na gestão da manutenção de seus ativos. O *Lean Manufacturing*, uma filosofia de gestão que visa à eliminação de desperdícios e à geração do valor para o cliente, tem se destacado como uma abordagem promissora para alcançar esses objetivos (WOMACK e JONES, 1996). Contudo, a aplicação dos princípios Lean na área de manutenção ainda é relativamente pouco explorada, apesar do seu potencial para melhorar significativamente a eficiência operacional e reduzir custos (DE OLIVEIRA, VIANA, ROBERTO e SOUTO, 2023).

Historicamente, a manutenção industrial era predominantemente reativa, caracterizada pela correção de falhas somente após sua ocorrência, o que resultava em altos custos e frequentes paradas não planejadas. A evolução para práticas preventivas e preditivas trouxe avanços significativos na confiabilidade dos equipamentos, mas ainda persistiam desafios relacionados ao desperdício de recursos, à baixa integração com os processos produtivos e à limitação do foco estratégico da manutenção (KELLY, 2006). Nesse contexto, o *Lean Manufacturing* surge como uma abordagem capaz de complementar essas práticas tradicionais ao introduzir princípios de eliminação sistemática de desperdícios, padronização de atividades e foco no valor agregado ao cliente, contribuindo para transformar a manutenção em uma função proativa e alinhada aos objetivos estratégicos da organização (ALMEIDA, SOUZA e REIS, 2022).

Segundo dados de 2021, paradas não planejadas podem representar perdas entre 5% e 20% da capacidade produtiva anual das empresas industriais (ABERDEEN GROUP, 2021). Além disso, estima-se que cada hora de interrupção não programada custe em média US\$ 532.000 em setores de manufatura pesada, considerando prejuízos operacionais e impactos na cadeia de suprimentos (SENSEYE, 2020). Esses números evidenciam a importância de estratégias de manutenção mais eficientes e alinhadas a filosofias como o *Lean Manufacturing*.

Este trabalho tem como objetivo a aplicação dos conceitos de *Lean Manufacturing* na gestão da manutenção. O foco é analisar como a integração de práticas Lean pode contribuir para a otimização dos processos de manutenção,

minimizando o tempo de inatividade dos equipamentos e aumentando a disponibilidade operacional.

Diante disso, este estudo investiga a necessidade das indústrias de aprimorar suas estratégias de manutenção para garantir máxima eficiência e confiabilidade dos ativos, sem custos excessivos. A manutenção corretiva tradicional revela-se insuficiente diante das crescentes exigências de produtividade e qualidade do mercado contemporâneo. Segundo Moubray (1997, p. 12):

A manutenção reativa, caracterizada pela atuação apenas após a falha ocorrer, não só provoca paradas inesperadas e custos elevados de reparo, como também resulta na perda de produtividade e aumento do risco de danos secundários aos equipamentos. **É fundamental que as organizações adotem estratégias de manutenção centradas na confiabilidade, que permitam não apenas a prevenção de falhas, mas também a otimização dos recursos utilizados para garantir a disponibilidade dos ativos.**

Nesse contexto, a aplicação dos princípios do *Lean Manufacturing* surge como uma alternativa promissora para transformar a manutenção em um processo mais enxuto, eficiente e alinhado com os objetivos organizacionais.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar a aplicação de ferramentas do *Lean Manufacturing* na gestão da manutenção, avaliando seus efeitos na eliminação de desperdícios, no incremento da eficiência dos processos e na elevação do desempenho organizacional como um todo. A pesquisa surge da necessidade de adaptar as práticas de manutenção às novas exigências do mercado, assegurando que as organizações mantenham sua competitividade e sustentabilidade a longo prazo. Além disso, o trabalho se diferencia por apresentar uma análise crítica da aplicação de práticas *Lean* especificamente no contexto da manutenção industrial, considerando aspectos culturais, operacionais e estratégicos que influenciam seus resultados, e por propor recomendações adaptadas à realidade brasileira.

1.1 Justificativa

A relevância do estudo sobre a aplicação do *Lean Manufacturing* na gestão de manutenção decorre da crescente necessidade das indústrias de otimizar seus processos para se manterem competitivas em um mercado cada vez mais globalizado. A manutenção eficiente de equipamentos e sistemas de produção é um fator crítico para a continuidade das operações, a redução de custos e a maximização

da produtividade. No entanto, muitas organizações brasileiras ainda enfrentam desafios significativos em suas práticas de manutenção, que frequentemente são realizadas de forma corretiva e não planejada, resultando em altos custos operacionais, perdas de eficiência e redução da vida útil de máquinas e equipamentos.

Levantamento da Confederação Nacional da Indústria (CNI) apontou que cerca de 45% das empresas industriais no Brasil ainda utilizam predominantemente abordagens corretivas em sua rotina de manutenção, o que compromete a confiabilidade dos ativos e amplia o tempo de parada (CNI, 2022). Estudos de caso nacionais, como o da Embraer e da Whirlpool, demonstram que a adoção de práticas Lean combinadas a metodologias preditivas possibilitou redução de até 30% nos custos de manutenção e aumentou a disponibilidade operacional das linhas produtivas em mais de 20% (ABDI, 2021).

A aplicação dos princípios Lean na manutenção é uma estratégia que busca eliminar desperdícios, melhorar a eficiência e agregar valor ao processo. Essa filosofia, amplamente aplicada na produção, tem mostrado resultados positivos em termos de redução de custos e melhoria de processos. No entanto, sua utilização na área de manutenção ainda é embrionária em grande parte das empresas nacionais, o que torna este estudo particularmente relevante. Ao investigar como as ferramentas Lean podem ser adaptadas da produção e aplicadas à manutenção, este trabalho contribui para preencher uma lacuna na literatura e na prática industrial.

A necessidade de realização deste trabalho justifica-se pela busca constante das empresas por estratégias que melhorem a eficiência operacional e reduzam custos. A manutenção é uma área que, quando otimizada, pode gerar impactos significativos na performance geral das operações industriais. Além disso, com a crescente complexidade dos sistemas produtivos e a pressão por redução de tempo de inatividade, torna-se imperativo encontrar formas mais eficazes de gerir a manutenção. Portanto, este estudo não só contribuirá para o desenvolvimento teórico na área, como também oferecerá percepções práticas que poderão ser aplicadas diretamente no contexto industrial brasileiro, auxiliando empresas a melhorar suas práticas de manutenção e, conseqüentemente, sua competitividade no mercado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é explorar e avaliar de forma crítica a aplicação dos princípios do *Lean Manufacturing* na gestão da manutenção industrial, com o propósito de aprimorar a eficiência dos processos de manutenção, reduzir desperdícios e otimizar o desempenho operacional das empresas. Este estudo busca compreender, a partir de uma revisão bibliográfica, de que maneira a integração das práticas Lean pode transformar a manutenção tradicional, frequentemente caracterizada por altos custos, baixa previsibilidade e pouca padronização, em um processo mais ágil, proativo e alinhado às melhores práticas de gestão industrial contemporânea.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os principais tipos de manutenção (corretiva, preventiva e preditiva) utilizados na indústria, destacando suas características, limitações e o papel que desempenham na eficiência operacional.
- Investigar como os princípios e ferramentas do *Lean Manufacturing* — como TPM, OEE, 5S, Kaizen e Just in Time — podem ser aplicados à gestão da manutenção industrial, com foco na eliminação de desperdícios e padronização de processos.
- Avaliar os resultados obtidos em estudos de caso e experiências práticas de empresas que adotaram o Lean na manutenção, identificando ganhos em disponibilidade, redução de custos e impacto na cultura organizacional.
- Propor diretrizes e recomendações para a aplicação eficaz do *Lean Manufacturing* na manutenção industrial, considerando as particularidades das empresas brasileiras, incluindo barreiras culturais, tecnológicas e estruturais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica tem como objetivo apresentar os principais conceitos, abordagens e estudos que sustentam este trabalho, oferecendo base científica para a análise da aplicação do Lean Manufacturing na manutenção industrial. Nesse sentido, são discutidos inicialmente os aspectos históricos e evolutivos da manutenção, passando pelas principais tipologias e práticas tradicionalmente adotadas. Em seguida, abordam-se os conceitos fundamentais do Lean Manufacturing, sua origem no Sistema Toyota de Produção e sua disseminação como filosofia de gestão orientada à eliminação de desperdícios e aumento da eficiência.

Além disso, exploram-se os pontos de convergência entre a manutenção e o pensamento enxuto, destacando como a incorporação de ferramentas Lean pode contribuir para transformar a manutenção em um processo mais proativo, confiável e alinhado aos objetivos estratégicos da organização. Por fim, são discutidas as tendências contemporâneas, como a Indústria 4.0 e a Indústria 5.0, que reforçam a necessidade de integrar práticas enxutas e digitais para garantir competitividade e sustentabilidade no cenário industrial atual.

2.1 Manutenção

A origem da palavra manutenção remonta ao latim *manus tenere*, que significa "ter à mão" ou "manter o que se tem", e por essa definição é possível entender que o conceito por trás da manutenção existe desde os primórdios da humanidade.

Segundo Kelly (2006), desde as primeiras civilizações até os dias atuais, os seres humanos desenvolvem estratégias e práticas para a preservação de ferramentas, construções, máquinas e sistemas complexos. Isso faz com que a história da manutenção tenha uma longa bagagem e diversos estudos a respeito.

Complementarmente, Tavares (1999) traz os registros iniciais de manutenções remontam ao final do século XIX, época conhecida pela mecanização da indústria. No entanto, a manutenção não era uma prioridade estratégica, era executada pelo próprio operador e praticamente em caráter corretivo após quebras e/ou falhas.

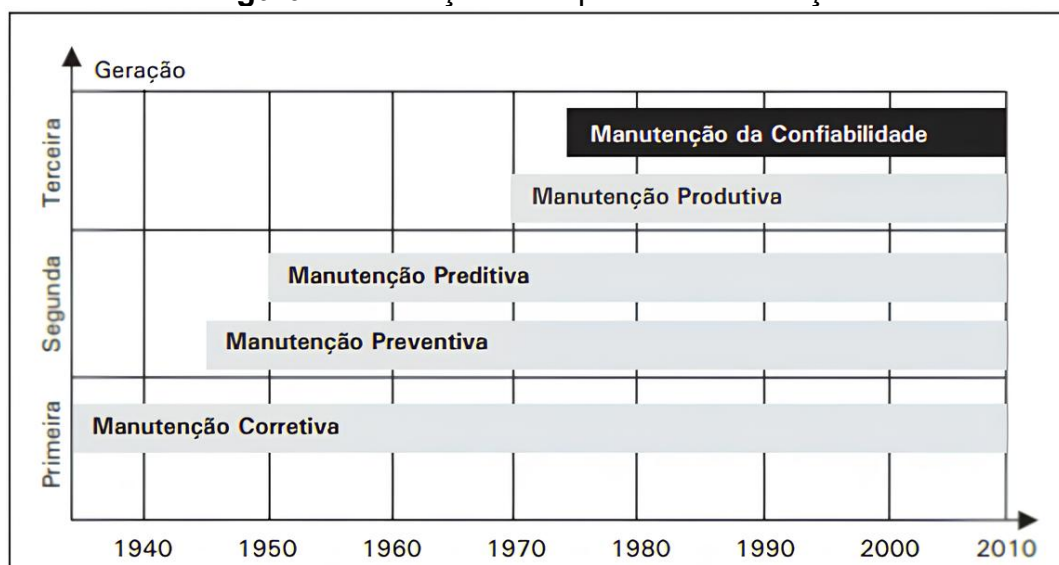
Com as evoluções industriais e avanços tecnológicos, a manutenção também evoluiu com o passar dos tempos. Hoje ela é entendida como área fundamental e que deve atuar ao lado dos processos produtivos. Com isso, o conceito de manutenção também se modificou, para se adaptar à sua nova utilização.

Um exemplo disso é a linha que defende Monchy (1987), de que a manutenção deve ser o princípio fundamental para assegurar alta produtividade, confiabilidade e longevidade do produto ou do equipamento. Esse processo envolve o desafio de reavaliar as estruturas inertes atuais e implementar métodos ajustados às novas características dos materiais. Além disso, o autor destaca que as atividades de manutenção precisam ser eficientes e eficazes para garantir o pleno funcionamento dos equipamentos, minimizar o tempo de inatividade e reduzir o risco de falhas inesperadas.

Já de acordo com a ABNT NBR 5462:1994, a manutenção pode ser definida como “a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida” (ABNT, 1994).

A evolução na história da manutenção se dá pela necessidade constante da indústria de elevar a produtividade e diminuir custos, usando a manutenção para reduzir tempos ociosos e evitar quebras e falhas de máquinas e equipamentos. Tal evolução gerou diferentes tipos e métodos de manutenção, sendo os três principais: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Evolução dos tipos de manutenção.



Fonte: Siqueira (2005)

Além dos 3 principais tipos de manutenção, obteve-se avanços na criação de outros dois conceitos, Manutenção Produtiva e Manutenção da Confiabilidade. A Manutenção Produtiva, também conhecida como TPM (Total Productive Maintenance), surgiu no Japão na década de 1970, integrada ao Sistema Toyota de Produção. Seu foco principal é maximizar a eficiência global dos equipamentos (OEE), por meio da eliminação de perdas, paradas não programadas e falhas de qualidade. Baseia-se no envolvimento de todos os colaboradores, promovendo a autonomia dos operadores em tarefas simples de manutenção, a padronização de processos e o treinamento contínuo. Dessa forma, busca alcançar resultados como “zero falhas” e “zero acidentes”, tornando-se um pilar estratégico do *Lean Manufacturing* (MOUBRAY, 1997).

Já a Manutenção Centrada na Confiabilidade, ou RCM (Reliability-Centered Maintenance), foi desenvolvida nos Estados Unidos na década de 1970, inicialmente no setor aeronáutico, com o objetivo de assegurar que os ativos desempenham suas funções com a confiabilidade exigida. Para isso, realiza análises estruturadas dos modos de falha e suas consequências, definindo estratégias de manutenção específicas de acordo com a criticidade dos equipamentos. Essa abordagem prioriza recursos nos ativos mais relevantes para a segurança, meio ambiente e produção, equilibrando custos, riscos e desempenho operacional. É considerada uma evolução das práticas de manutenção, por aliar rigor técnico à gestão eficiente dos ativos (KELLY, 2006).

Podemos observar ainda, a partir da análise da Figura 1, que os principais avanços se dão em meados da década de 40, época do fim da Segunda Guerra Mundial e início da Guerra Fria, com uma grande evolução tecnológica e das técnicas de manutenção.

2.2 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva, conhecida também como "manutenção de emergência" ou "reparação de falhas", é caracterizada pela intervenção somente após o aparecimento de um defeito ou parada do equipamento. Durante o final do século XIX e início do século XX, com a industrialização, a manutenção corretiva era amplamente adotada, pois as máquinas eram menos complexas e o custo de reparo após falhas era visto como aceitável (POÓR, ŽENÍŠEK e BASL, 2019). No entanto,

com o aumento da complexidade dos sistemas e a demanda por maior eficiência operacional, essa estratégia revelou seus pontos fracos, como tempos de inatividade inesperados e altos custos de paradas não planejadas e reposição de peças.

Moubray (1997) discute como, com o surgimento de tecnologias mais sofisticadas, a manutenção corretiva passou a ser vista como uma solução de curto prazo, adequada em casos em que a falha não implica grandes riscos à operação. No entanto, ele alerta que, dependendo do contexto industrial, a aplicação exclusiva dessa abordagem pode ser desastrosa, resultando em altos custos de produção e de segurança.

De forma complementar, Wireman (2010) aponta que, embora seja a estratégia mais simples e de menor custo imediato, a manutenção corretiva pode se tornar financeiramente inviável em sistemas críticos, onde o impacto de falhas é significativo.

2.3 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva foi introduzida no século XX, principalmente após a Segunda Guerra Mundial, como uma forma de minimizar os problemas resultantes da manutenção corretiva. Ao invés de reagir às falhas, essa abordagem visa evitá-las por meio de ações periódicas e programadas, como inspeções, limpezas, ajustes e substituições de componentes desgastados antes de apresentarem problemas. Isso aumenta a confiabilidade dos equipamentos e reduz a probabilidade de falhas inesperadas.

Kelly (2006) argumenta que a manutenção preventiva, ao ser aplicada corretamente, melhora a eficiência operacional, estendendo a vida útil dos equipamentos e diminuindo os custos de reparo a longo prazo. No entanto, ele também observa que pode gerar intervenções desnecessárias, o que implica custos adicionais, já que a manutenção pode ser realizada em um equipamento que ainda não estava próximo de falhar. Para balancear esse desafio, o uso de análises detalhadas dos ciclos de vida dos componentes e histórico de falhas é essencial.

De acordo com Al-Najjar (1997), a manutenção preventiva deve ser cuidadosamente planejada e otimizada para maximizar seus benefícios. Ele discute que, apesar de seus custos iniciais serem mais altos, a economia a longo prazo,

resultante da redução de falhas e da melhoria no desempenho dos equipamentos, justifica sua aplicação em muitos setores industriais.

2.4 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é uma abordagem avançada que utiliza técnicas de monitoramento contínuo para prever falhas antes que elas ocorram, permitindo que a manutenção seja realizada apenas quando necessário. Essa metodologia começou a ganhar força nos anos 1980 com o avanço das tecnologias de sensoriamento e monitoramento de condições, como análises de vibração, termografia e ultrassom. Ao contrário da manutenção preventiva, que é baseada em intervalos fixos, a manutenção preditiva se baseia no real estado do equipamento.

Diferenciar manutenção preventiva e preditiva pode ser complexo, pois ambas visam prevenir falhas e minimizar paradas inesperadas. A preventiva ocorre em intervalos fixos ou com base no tempo de operação, independentemente do estado do equipamento, buscando reduzir o desgaste, como a troca periódica de óleo. Já a preditiva fundamenta-se no monitoramento contínuo de parâmetros como vibração, temperatura ou análise de óleo, intervindo apenas quando indicativos de falha são detectados (ALMEIDA, 2015). Assim, a preventiva atua por precaução, enquanto a preditiva age sob evidência, otimizando recursos e evitando intervenções desnecessárias.

Ainda de acordo com Almeida (2015), a manutenção preditiva permite uma otimização dos recursos, uma vez que as intervenções são realizadas de maneira direcionada e no momento certo, evitando tanto a falha quanto as paradas desnecessárias. O autor destaca que a preditiva representa um salto tecnológico em relação à preventiva, pois reduz ainda mais o tempo de inatividade e melhora a gestão do ciclo de vida dos ativos.

Jardine *et al.* (2006) explica que as tecnologias de monitoramento preditivo, como sensores de desgaste, análise de vibração e monitoramento de temperatura, são essenciais para identificar falhas potenciais com antecedência. No entanto, ele observa que a implementação dessas tecnologias requer um investimento significativo em infraestrutura e conhecimento técnico, o que pode ser uma barreira para algumas indústrias.

2.5 Manutenção Produtiva Total (TPM)

A Manutenção Produtiva Total (TPM) é uma metodologia de gestão de manutenção originada no Japão, com o objetivo de maximizar a eficiência dos equipamentos por meio da participação de toda a equipe na gestão e manutenção dos ativos. O TPM é um sistema integrado que envolve todos os colaboradores da empresa, desde operadores de máquinas até a alta direção, para garantir a eliminação de falhas e o aumento da produção (ALMEIDA, 2015).

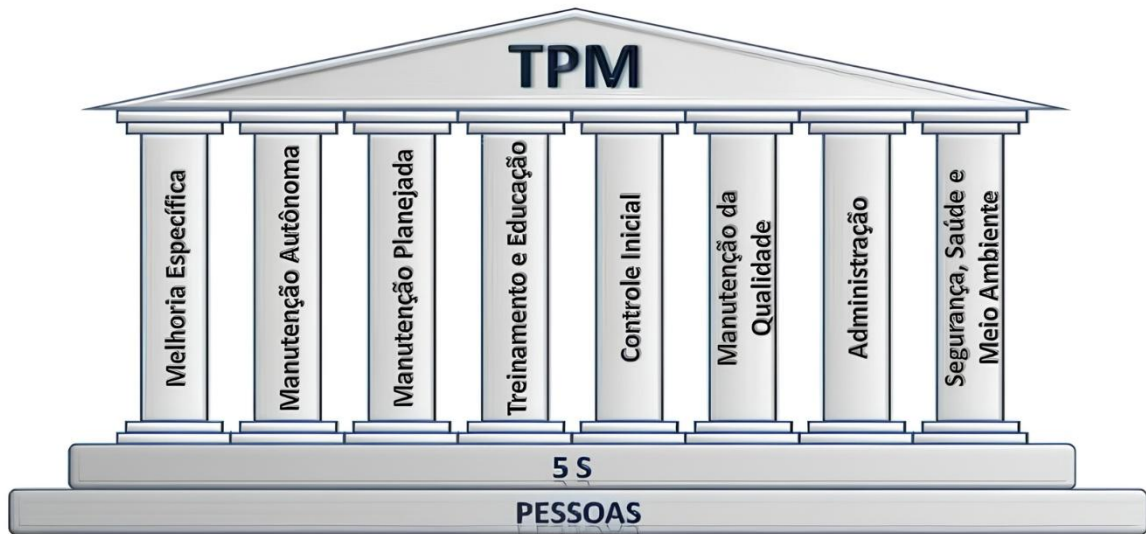
A TPM teve sua origem no Japão na década de 1970, quando a empresa Nippondenso, fornecedora da Toyota, buscava uma maneira de reduzir as perdas de produtividade devido a problemas de manutenção nos equipamentos. A Nippondenso, sob a orientação do Instituto Japonês de Manutenção de Planta (JIPM), desenvolveu uma abordagem que integrava práticas de manutenção com a participação de todos os funcionários da organização, rompendo com a visão tradicional de que a manutenção era responsabilidade exclusiva de um departamento especializado.

De acordo com Nakajima (1988), um dos principais proponentes do TPM, o conceito visa promover a "zero falhas", "zero defeitos" e "zero acidentes" nas operações produtivas. A filosofia TPM se baseia em oito pilares principais, como a manutenção autônoma (realizada pelos operadores), melhoria focada, educação e treinamento, e segurança. O envolvimento de todos os níveis da organização é um dos fatores essenciais para o sucesso da metodologia (NAKAJIMA, 1988).

O TPM ganhou popularidade global a partir dos anos 1980, sendo adotado inicialmente pelas indústrias automotiva e de manufatura. Diferentemente de outros sistemas de manutenção, o TPM integra os operadores diretamente nas atividades de manutenção, transformando-os em agentes ativos na prevenção de falhas e na melhoria contínua dos processos.

Tsang (2002) destaca que a TPM é estruturada em oito pilares, conforme exemplifica a Figura 2, sendo a manutenção autônoma um dos mais importantes. Neste pilar, os operadores assumem parte da responsabilidade pela manutenção dos equipamentos que utilizam, realizando atividades como limpeza, inspeção e ajustes menores. Isso reduz a dependência do departamento de manutenção e aumenta a conscientização dos operadores sobre o estado de suas máquinas.

Figura 2 – Pilares do TPM



Fonte: Adaptado de Nakajima (1988) e Nakazato (1999)

Outro pilar fundamental é a manutenção planejada, que consiste na execução de manutenções baseadas em dados históricos e condições reais dos equipamentos, garantindo que as intervenções sejam feitas de maneira eficiente. Além disso, Wang e Lee (2001) ressaltam que o TPM promove a melhoria contínua (kaizen) por meio de grupos de trabalho e de análise das causas-raiz de falhas, visando a eliminação de problemas recorrentes e a implementação de soluções duradouras.

A implementação do TPM traz uma série de benefícios para as organizações, especialmente no aumento da eficiência dos equipamentos e na redução de falhas. Ao integrar todos os funcionários no processo de manutenção, o TPM permite que os problemas sejam identificados e resolvidos rapidamente, aumentando a disponibilidade das máquinas e reduzindo os custos de manutenção.

Segundo Ahuja e Khamba (2008), o TPM contribui significativamente para a melhoria do Overall Equipment Effectiveness (OEE), um indicador-chave de desempenho que mede a eficiência global do equipamento. Ao focar na eliminação de perdas, como falhas de equipamentos, setups demorados e paradas pequenas, o TPM possibilita um aumento substancial na produtividade e na confiabilidade dos ativos.

No entanto, os autores também apontam que a implementação do TPM pode ser desafiadora, especialmente em organizações onde a cultura de melhoria contínua ainda não está enraizada. O sucesso da implantação depende de uma

mudança organizacional que exige o comprometimento da alta direção, o envolvimento dos operadores e um programa robusto de treinamento (NAKAJIMA, 1988).

A Manutenção Produtiva Total (TPM) se integra naturalmente ao *Lean Manufacturing*, pois ambos compartilham o objetivo de maximizar a eficiência dos processos e eliminar desperdícios. Enquanto o Lean foca na redução de perdas em toda a cadeia produtiva, otimizando fluxos e recursos, o TPM atua especificamente na confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, assegurando que a produção não seja interrompida por falhas ou paradas não programadas. Dessa forma, a implementação do TPM fortalece os pilares do Lean, promovendo operações mais estáveis, seguras e eficientes, e criando um ambiente em que a melhoria contínua e a autonomia dos colaboradores caminham lado a lado (GUPTA e BOYER, 2009).

2.6 Lean Manufacturing

O *Lean Manufacturing*, que pode ser traduzido como manufatura enxuta, é uma filosofia de gestão que tem como objetivo principal eliminar desperdícios nos processos produtivos, aumentando a eficiência e o valor para o cliente. Essa metodologia surgiu no Japão, mais especificamente no Sistema Toyota de Produção, e desde então tem sido amplamente adotada em indústrias de diversos setores ao redor do mundo. A seguir, são abordadas suas principais características, histórico e evolução.

A origem do *Lean Manufacturing* remonta ao Japão, na década de 1950, com o desenvolvimento do Sistema Toyota de Produção (TPS) (OHNO, 1988). O TPS foi criado como uma resposta às condições pós-Segunda Guerra Mundial, onde a escassez de recursos forçou as empresas japonesas a desenvolverem métodos mais eficientes para a fabricação de produtos. A Toyota, liderada por Taiichi Ohno e Shigeo Shingo, estabeleceu uma abordagem que eliminava desperdícios, maximizava o valor e reduzia os tempos de ciclo (SHINGO, 1996).

Segundo Ohno (1988), o principal foco do TPS era eliminar os sete tipos de desperdícios (*muda*, em japonês): superprodução, tempo de espera, transporte, processamento excessivo, estoque, movimento e defeitos. Dentro do Sistema Toyota de Produção (TPS), o combate ao desperdício é considerado um dos pilares fundamentais para a eficiência operacional. Além do foco tradicional no *Muda*, o TPS

também incorpora a análise de outros dois conceitos essenciais: *Mura* e *Muri*. O *Mura* está relacionado à variabilidade e irregularidade dos processos, que geram instabilidade e dificultam o fluxo contínuo de produção, enquanto o *Muri* refere-se à sobrecarga de pessoas ou equipamentos, ocasionando falhas, quebras e redução da produtividade. Segundo Ohno (1988), esses três elementos — *Muda*, *Mura* e *Muri* — estão interligados e devem ser eliminados de forma conjunta para que o sistema funcione de maneira eficiente, sustentável e alinhada ao princípio de melhoria contínua (*Kaizen*).

O resultado foi uma redução drástica nos custos de produção e um aumento na qualidade e eficiência dos processos. A Figura 3 descreve cada um dos sete tipos de desperdícios.

Figura 3 - Os sete desperdícios (*muda*) do Sistema Toyota de Produção.



Fonte: CARVALHO; LEITE (2021).

O *Lean Manufacturing*, como é conhecido hoje, baseia-se nesses mesmos princípios de melhoria contínua (*kaizen*), com a inclusão do respeito pelas pessoas, seu intelecto e criatividade, adicionando a busca pela eliminação de atividades que não agregam valor ao produto final. Com o passar do tempo, as grandes organizações compreenderam como a capacidade de produção dos seus funcionários deve ser

aproveitada ao máximo. A Figura 4 ilustra como é entendido os tipos de desperdícios atualmente.

Figura 4 - Princípios de Melhoria do *Lean Manufacturing* atualmente.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A metodologia Lean começou a se expandir globalmente a partir dos anos 1980, quando pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT) conduziram estudos sobre a competitividade global das indústrias automobilísticas. O resultado desses estudos foi publicado no livro "The Machine That Changed the World" de Womack, Jones e Roos (1990), onde os autores identificam a Toyota como um modelo de eficiência a ser seguido por indústrias em todo o mundo.

De acordo com Womack e Roos (1990), as empresas ocidentais começaram a adotar os princípios do *Lean Manufacturing* como forma de enfrentar a crescente competitividade global. Esse processo de difusão foi impulsionado pela necessidade de aumentar a flexibilidade e reduzir os custos de produção, e resultou na adaptação dos princípios Lean a diferentes indústrias além da automotiva, como o setor aeroespacial, saúde, tecnologia e até serviços.

O *Lean Manufacturing* envolve um conjunto de ferramentas e práticas voltadas para a eliminação de desperdícios e a melhoria contínua dos processos produtivos (WOMACK e JONES, 1996). Entre as principais práticas estão o *Just-In-Time* (JIT), que visa a produção somente na medida da demanda, e o Jidoka, que garante a qualidade no processo produtivo. A Figura 5 elucida como essas duas ferramentas são os pilares das ideologias Lean.

Figura 5 - Bases, conceitos e pilares do Lean.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Conforme Liker (2004), o JIT permite que as empresas reduzam estoques e melhorem o fluxo de produção, enquanto o Jidoka garante que os problemas sejam identificados imediatamente, prevenindo que defeitos avancem ao longo da linha de produção. Outras ferramentas essenciais do Lean incluem o 5S, para organização do ambiente de trabalho, o TPM (Manutenção Produtiva Total), que visa maximizar a eficiência dos equipamentos por meio da manutenção autônoma e preventiva, e o

Kaizen, que promove a melhoria contínua por meio de pequenas mudanças realizadas de forma sistemática e com o envolvimento de todos os colaboradores.

Dentro das ferramentas mais utilizadas dentro do conceito de Jidoka, destaca-se uma que é frequentemente utilizada para identificar as causas raízes de problemas, o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito ou espinha de peixe. Segundo Slack et al. (2009), essa representação gráfica permite visualizar, de forma estruturada, os fatores que contribuem para a ocorrência de falhas, agrupando-os em categorias como métodos, materiais, mão de obra, máquinas, meio ambiente e medições. Ao utilizar essa ferramenta, as equipes conseguem mapear e compreender melhor os fatores que afetam o desempenho dos equipamentos e processos, promovendo ações corretivas mais eficazes e alinhadas com os princípios de eliminação de erros do Lean.

A partir dessa identificação detalhada de causas, é necessário determinar quais problemas devem ser tratados com maior prioridade. Para isso, Campos (2004) destaca a aplicação da Matriz GUT, que auxilia na priorização das ações a partir da análise de três critérios fundamentais: gravidade, urgência e tendência. Ainda segundo Campos (2004), essa metodologia contribui para a melhor alocação de recursos e esforços da equipe, garantindo que os problemas mais críticos sejam solucionados primeiro, o que aumenta a eficiência das ações e reduz falhas recorrentes. A Matriz GUT, portanto, reforça a lógica Lean ao direcionar as intervenções para os pontos que geram maior impacto nos resultados operacionais.

Com os problemas priorizados, torna-se essencial visualizar e compreender o fluxo das atividades para garantir padronização e fluidez nas ações. Segundo Harrington (1991), é nessa etapa que a aplicação de um fluxograma de processos se torna necessária. Essa ferramenta permite descrever graficamente cada etapa de um processo, facilitando a identificação de gargalos, retrabalhos e tarefas desnecessárias. No Lean, o fluxograma é fundamental para promover a padronização e o controle dos processos de manutenção, além de apoiar a comunicação entre as áreas envolvidas, melhorando a execução e o acompanhamento das rotinas operacionais.

Além das ferramentas já mencionadas, outras metodologias e indicadores também se conectam às práticas Lean e à melhoria contínua da qualidade. Destacam-se o MTBF (Mean Time Between Failures) e o MTTR (Mean Time to Repair), que permitem monitorar a confiabilidade e a eficiência dos equipamentos; o Ciclo PDCA,

que orienta a gestão de processos por meio de planejamento, execução, verificação e ação corretiva; o Diagrama de Pareto, que identifica os problemas mais relevantes a serem priorizados e pode ser utilizado como alternativa à Matriz GUT, concentrando esforços nos fatores vitais que causam a maior parte dos efeitos negativos; e o Histograma, que permite visualizar a distribuição e a variação dos dados de processo, auxiliando na identificação de padrões e tendências. Essas ferramentas facilitam a tomada de decisão baseada em dados, a otimização de processos e a redução de desperdícios, fortalecendo a cultura Lean e a eficiência operacional (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2010).

Apesar da grande quantidade de ferramentas existentes dentro da metodologia, Hines e Taylor (2000) enfatizam que o sucesso da implementação Lean depende de uma cultura organizacional voltada para a melhoria contínua e o envolvimento de todos os níveis da empresa. Sem essa mentalidade de todos os agentes envolvidos nos processos, as ferramentas por si só não conseguem gerar os resultados esperados.

2.7 Overall Equipment Effectiveness (OEE)

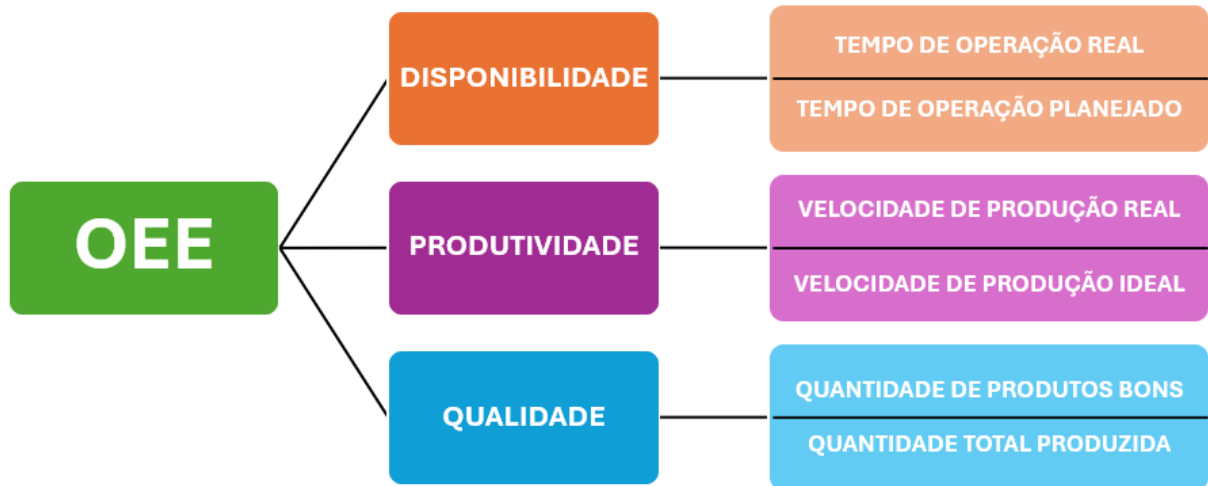
O Overall Equipment Effectiveness (OEE), que em português significa Eficiência Global do Equipamento, é uma métrica amplamente utilizada para medir a eficiência operacional dos equipamentos em processos de manufatura. Desenvolvida para avaliar o desempenho total dos ativos, a OEE considera três fatores principais: disponibilidade, performance e qualidade (NAKAJIMA, 1988).

O conceito de OEE foi desenvolvido inicialmente na década de 1960 pela Toyota como parte do Sistema Toyota de Produção (TPS). O objetivo era fornecer uma métrica compreensiva para medir a eficácia dos equipamentos e identificar áreas para melhoria. A OEE foi formalmente introduzida e popularizada por Nakajima (1988), que descreveu a métrica em seu trabalho sobre Manutenção Produtiva Total (TPM).

Nakajima (1988) define a OEE como uma medida que avalia a eficiência global dos equipamentos ao considerar três aspectos cruciais: Disponibilidade (tempo de operação real vs. tempo de operação planejado), Performance (velocidade real vs. velocidade ideal) e Qualidade (quantidade de produtos bons vs. quantidade total produzida), conforme a Figura 6 apresenta. Esses três componentes são multiplicados

entre si para fornecer um índice que pode variar de 0% a 100%, onde 100% representam a eficiência ideal.

Figura 2 - Componentes da Eficiência Global dos Equipamentos (OEE).



Fonte: Adaptado de Nakajima (1988)

A OEE ganhou reconhecimento global a partir dos anos 1980, especialmente com a disseminação dos princípios do TPM. A métrica tornou-se uma ferramenta essencial para empresas que buscam melhorar a eficiência e reduzir desperdícios na produção. Sullivan (1986) foi um dos primeiros a adaptar a OEE para a indústria ocidental, enfatizando sua importância na análise detalhada da eficácia dos equipamentos e na implementação de estratégias de melhoria contínua.

De acordo com Sullivan (1986), a OEE permite que as empresas identifiquem e quantifiquem as perdas associadas aos equipamentos e processos produtivos, proporcionando uma visão clara sobre onde as melhorias são necessárias. A métrica é especialmente útil em ambientes de produção com alta intensidade de equipamentos, como indústrias automotivas e de bens de consumo, onde a eficácia operacional é crítica para a competitividade.

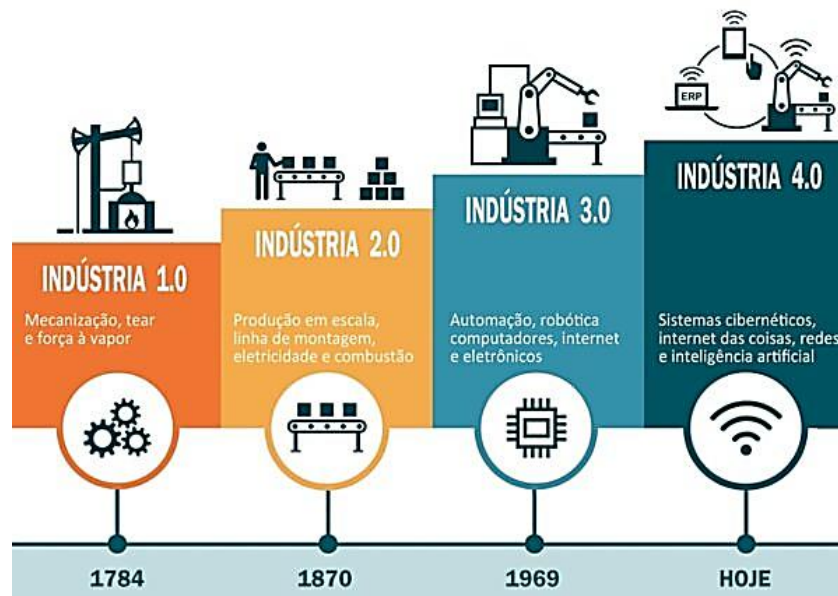
A aplicação da OEE oferece diversos benefícios, como a capacidade de identificar rapidamente áreas de perda e a eficácia das estratégias de manutenção e operação. Sutton (1994) destaca que a OEE é uma ferramenta poderosa para aumentar a produtividade, pois proporciona um quadro claro das perdas em termos de disponibilidade, performance e qualidade, permitindo que as organizações adotem medidas corretivas específicas.

No entanto, Sutton (1994) também alerta que a implementação eficaz da OEE pode enfrentar desafios, como a necessidade de coleta precisa de dados e a resistência à mudança por parte da equipe. A métrica exige um sistema robusto de monitoramento e análise para garantir a precisão e a utilidade das informações obtidas.

2.8 Indústria 4.0

A evolução dos sistemas produtivos industriais ocorreu em ondas sucessivas, desde a mecanização e a introdução da máquina a vapor na chamada Primeira Revolução Industrial, no século XVIII, até a automação eletrônica e informática que caracterizou a Terceira Revolução Industrial no final do século XX (SLACK, BRANDON-JONES e BURGESS, 2016). Segundo Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), foi a convergência de tecnologias digitais, físicas e biológicas que deu origem ao conceito de Indústria 4.0, também denominada Quarta Revolução Industrial, a partir de iniciativas lançadas na Alemanha em 2011. A Figura 3 apresenta o histórico das revoluções na indústria mundial.

Figura 3 - Linha do tempo das revoluções industriais.



Fonte: Perin (2025)

A Primeira Revolução Industrial (1760-1840) foi marcada pela mecanização da produção têxtil e pelo uso intensivo da energia a vapor. A Segunda Revolução (final

do século XIX até início do século XX) consolidou a eletrificação das fábricas, linhas de montagem e a produção em massa. Já a Terceira Revolução, conhecida como Revolução Digital, promoveu a automação por meio de eletrônica, TI e robótica a partir das décadas de 1970 e 1980 (SCHWAB, 2016).

Neste contexto histórico, a Indústria 4.0 se apresenta como a integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), sistemas ciberfísicos, big data e inteligência artificial, permitindo operações autônomas e inteligentes em tempo real (HERMANN, PENTEK e OTTO, 2016). Essa nova etapa introduziu conceitos como fábricas inteligentes, manutenção preditiva baseada em dados e digitalização completa das cadeias de valor. De acordo com Lasi *et al.* (2014), a Indústria 4.0 representa uma transformação profunda que exige mudanças não apenas tecnológicas, mas também culturais e organizacionais.

No Brasil, estudos como o de Santos e Martens (2019) destacam que a adoção dos princípios da Indústria 4.0 ainda ocorre de forma desigual, em parte devido a barreiras de infraestrutura e qualificação profissional. Entretanto, empresas que já implantaram soluções de digitalização reportam ganhos expressivos em produtividade e redução de custos.

Nesse ambiente dinâmico, a gestão da manutenção ganha relevância estratégica. A manutenção 4.0 se diferencia da manutenção tradicional ao incorporar sensores inteligentes, monitoramento remoto, análise preditiva e integração com sistemas ERP e MES. De acordo com Almeida e Souza (2022), tais práticas permitem aumentar a confiabilidade e a disponibilidade dos ativos produtivos, assegurando competitividade em mercados cada vez mais exigentes.

A convergência entre Indústria 4.0 e *Lean Manufacturing* representa uma das tendências mais relevantes da gestão industrial contemporânea. Enquanto o Lean se dedica à eliminação sistemática de desperdícios e ao fluxo contínuo de valor (WOMACK e JONES, 1996), a Indústria 4.0 potencializa esses princípios por meio de dados em tempo real e automação inteligente. Nakajima (1988) já defendia que a manutenção deveria ser integrada à estratégia produtiva para garantir qualidade e desempenho. Hoje, essa integração se torna ainda mais essencial.

Assim, a aplicação dos conceitos de *Lean Manufacturing* na manutenção industrial emerge como uma abordagem capaz de preparar as empresas para os desafios da Indústria 4.0. Ao unir a filosofia enxuta com recursos digitais avançados, é possível desenvolver processos mais eficientes, proativos e alinhados com os

objetivos estratégicos da Quarta Revolução Industrial, garantindo não apenas a redução de custos, mas também a sustentabilidade, a confiabilidade e a inovação contínua.

Com o avanço das tecnologias digitais e a consolidação dos sistemas inteligentes no ambiente industrial, surge a Indústria 5.0 como uma proposta complementar e evolutiva em relação à Indústria 4.0. Diferente do foco predominantemente tecnológico da etapa anterior, a Indústria 5.0 resgata o papel central do ser humano nos processos produtivos, priorizando a personalização em massa, a sustentabilidade e a colaboração homem-máquina.

Segundo a Comissão Europeia (2021), essa nova abordagem visa um modelo produtivo mais resiliente, ético e centrado em valores sociais, em que tecnologias como robôs colaborativos, inteligência artificial e análise preditiva são utilizadas para potencializar as capacidades humanas, e não as substituir. Nesse cenário, o alinhamento entre *Lean Manufacturing* e práticas de manutenção torna-se ainda mais relevante, pois une a eficiência enxuta à flexibilidade e à inovação necessárias para atender às demandas da nova era industrial.

A integração da Indústria 4.0 com as práticas de *Lean Manufacturing* e TPM potencializa a eficiência e a confiabilidade dos processos produtivos. Enquanto o Lean busca eliminar desperdícios e otimizar fluxos, o TPM assegura a disponibilidade e desempenho dos equipamentos por meio da manutenção preventiva, preditiva e da autonomia dos operadores. A Indústria 4.0 complementa essas abordagens ao fornecer dados em tempo real, monitoramento inteligente e análises preditivas, permitindo decisões mais rápidas e precisas. Dessa forma, a convergência dessas três abordagens promove operações mais enxutas, seguras e confiáveis, alinhadas à melhoria contínua e à transformação digital da produção (LOPES; SILVA, 2020).

3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foi adotada a metodologia de revisão bibliográfica, que consiste em analisar e sintetizar o conhecimento produzido sobre o tema a partir de fontes secundárias, como livros, artigos e outros materiais acadêmicos. Segundo Lakatos e Marconi (2010), a revisão bibliográfica é fundamental para a construção de uma base teórica sólida, permitindo compreender o desenvolvimento histórico do assunto e identificar as principais contribuições já publicadas, especialmente em temas consolidados como o *Lean Manufacturing* e a gestão da manutenção.

De acordo com Severino (2017), a pesquisa bibliográfica possibilita mapear o estado atual do conhecimento científico, reunindo informações já existentes e qualificadas para entender o panorama do tema de estudo. Ela também ajuda a identificar lacunas e limitações na literatura, fundamentando a justificativa e os objetivos da pesquisa, além de definir caminhos para futuras investigações. Portanto, a revisão realizada neste trabalho buscou apresentar as tendências recentes e os desafios na aplicação do *Lean Manufacturing* na manutenção industrial.

Conforme ressaltam Cervo, Bervian e Silva (2007), a revisão bibliográfica é uma etapa essencial para embasar teoricamente a pesquisa, estabelecendo conexões entre as diversas abordagens e autores. Esse processo inclui a seleção criteriosa das fontes, análise comparativa dos conteúdos e síntese dos principais pontos, que orientam a construção do referencial teórico e do arcabouço metodológico. No presente estudo, essa metodologia permitiu identificar padrões, divergências e oportunidades para a aplicação de ferramentas Lean no contexto da manutenção.

Para a coleta dos dados recentes, foi realizada uma busca sistemática nas plataformas Periódicos CAPES e Google Scholar, conforme Figura 8, utilizando combinações específicas de palavras-chave relacionadas ao tema, em inglês e português, tais como "*Lean Manufacturing*" / "Manufatura Enxuta", "Maintenance Management" / "Gestão de Manutenção", "Lean Maintenance" / "Manutenção Enxuta" e "Industrial Maintenance" / "Manutenção Industrial". Inicialmente, a busca foi realizada sem filtro temporal e com uma classificação para identificar as fontes mais citadas e reconhecidas, resultando em um grande volume de publicações: aproximadamente 22 artigos na plataforma CAPES e mais de 14.500 no Google

Scholar, sendo que as fontes com maiores frequências de citações foram separadas para análise, considerando que são fontes renomadas e amplamente aceitas pela comunidade científica.

Posteriormente, visando a atualização das informações e a seleção de publicações mais recentes, foi aplicado um filtro temporal para considerar somente artigos publicados no período de 2010 a 2025, reduzindo o total para cerca de 20 artigos na plataforma CAPES e 13.100 no Google Scholar.

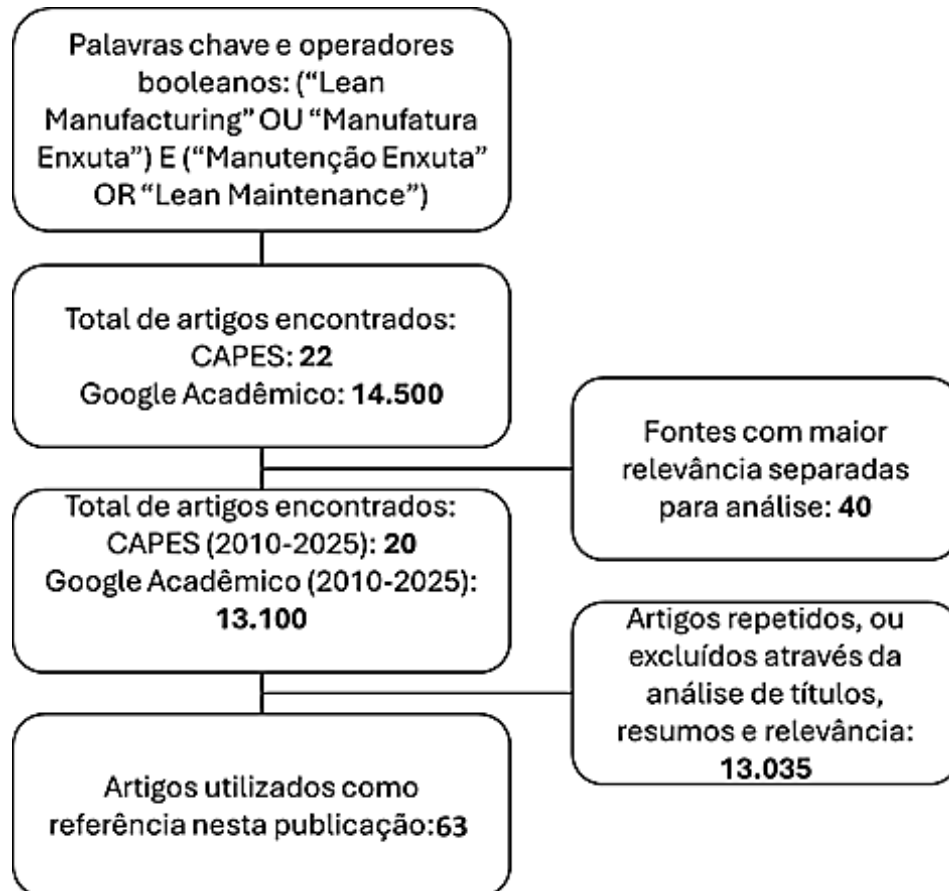
Para melhorar a precisão dos resultados, utilizou-se a combinação de operadores booleanos nas buscas, como: (“*Lean Manufacturing*” OR “Manufatura Enxuta” OR “Lean Maintenance” OR “Manutenção Enxuta”) AND (“Industrial Maintenance” OR “Manutenção Industrial” OR “Maintenance Management” OR “Gestão de Manutenção”). Após aplicar esses filtros e operadores, os resultados foram reduzidos para 15 artigos na plataforma CAPES e 7.500 no Google Scholar.

Na fase seguinte, com foco na aplicação do *Lean Manufacturing* especificamente na manutenção industrial, a combinação utilizada foi: (“*Lean Manufacturing*” OR “Manufatura Enxuta”) AND (“Maintenance” OR “Manutenção”) AND (“Case Study” OR “Estudo de Caso” OR “Implementation” OR “Implementação”), mantendo o filtro de data de 2010 a 2025. Essa pesquisa resultou em 9 artigos na CAPES e 650 no Google Scholar.

A partir da leitura dos títulos e resumos, e da aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, a quantidade final de artigos selecionados para análise e referência nesta revisão bibliográfica foi de 85 publicações, sendo que foram utilizadas um total de 63 referências neste trabalho.

Foram considerados para inclusão artigos publicados entre 1986 e 2025 que abordassem a aplicação do *Lean Manufacturing* na gestão ou processos de manutenção industrial, com estudos de caso, revisões sistemáticas, benchmarks ou análises comparativas, e disponíveis em português, inglês ou espanhol. Foram pesquisados também publicações referentes a temas específicos para fundamentações teóricas, a fim de se obter fontes focadas em determinados assuntos e com propriedade para definir termos adicionais relevantes e presentes nesta pesquisa.

Figura 4 - Fluxograma de representação da seleção de artigos.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A análise dos dados coletados seguiu uma abordagem qualitativa e comparativa, buscando identificar padrões, convergências e divergências entre os autores. Os dados foram organizados em quadros comparativos e matrizes para facilitar a extração das principais conclusões sobre a contribuição do *Lean Manufacturing* para a melhoria dos processos de manutenção, sobretudo na redução de desperdícios, aumento da eficiência e sustentabilidade operacional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do *Lean Manufacturing* na manutenção industrial vem se consolidando como uma estratégia indispensável para empresas que desejam aprimorar sua eficiência operacional, reduzir desperdícios e elevar o nível de confiabilidade dos ativos. Estudos demonstram que os princípios Lean são capazes de transformar a manutenção em um processo sistemático e proativo, potencializando resultados financeiros, operacionais e culturais.

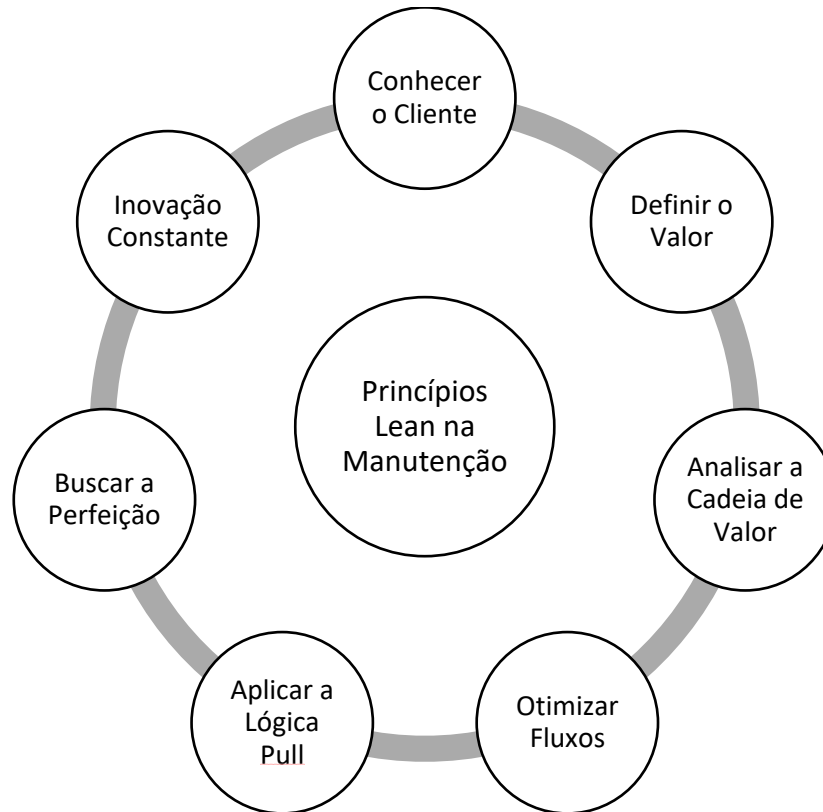
Dados publicados por Hines, Holweg e Rich (2004) destacam que a aplicação de práticas enxutas pode gerar um aumento médio de 28% na eficiência dos processos industriais, resultado diretamente associado à redução de falhas e paralisações inesperadas. Em empresas que adotaram o modelo Lean, estudos de caso revelaram melhorias expressivas, como redução de até 40% no tempo de inatividade e economia aproximada de 25% nos custos de manutenção (Shah e Ward, 2007). Esses resultados demonstram o potencial do *Lean Manufacturing* como diferencial competitivo no ambiente industrial.

Um exemplo prático ocorre na indústria automobilística, onde a Toyota, pioneira do *Lean Manufacturing*, reportou que a implementação de metodologias como Total Productive Maintenance (TPM) resultou em uma redução de 50% nos custos operacionais relacionados à manutenção preventiva e corretiva (Nakajima, 1988). Além disso, a utilização do Kanban para o controle de peças sobressalentes mostrou-se fundamental para garantir reposições rápidas e evitar atrasos críticos na execução das ordens de serviço (LIKER, 2004).

Além dos ganhos operacionais e financeiros, a adoção do *Lean Manufacturing* também gerou impactos positivos sobre a cultura organizacional. O envolvimento das equipes na melhoria contínua aumentou o engajamento, o senso de responsabilidade e a qualidade do trabalho realizado. O uso de práticas de Kaizen, treinamentos regulares e reuniões de análise de problemas fomentou um ambiente colaborativo e inovador (HINES, HOLWEG E RICH, 2004).

Para facilitar o entendimento e implantação das ferramentas de Lean no setor de manutenção é necessário compreender os princípios da tecnologia de gestão, tornando possível repassar o conhecimento para os agentes de modificação de cultura do setor. A imagem abaixo representa os principais ideais do *Lean Manufacturing* que são aplicados na gestão da manutenção.

Figura 5 - Princípios Lean na Manutenção.



Fonte: Pinto, 2013; Smith, 2004

Para integrar efetivamente os princípios do *Lean Manufacturing* na gestão da manutenção, é fundamental iniciar pelo conhecimento aprofundado do cliente interno, que, neste contexto, corresponde ao setor de produção industrial e suas instalações. Somente a partir desse entendimento é possível definir com clareza os valores que esse cliente espera da função manutenção. Tais valores englobam, entre outros aspectos, a redução dos tempos não produtivos, a execução de atividades de forma segura e sem acidentes, a contenção de custos operacionais, a eficiência nos serviços realizados, além da confiabilidade dos equipamentos e a padronização dos processos (PINTO, 2013).

A identificação e definição do valor devem ser seguidas por uma análise detalhada da cadeia de valor da manutenção, contemplando tanto os processos de planejamento e controle das operações quanto todas as atividades de caráter direto, com o objetivo de reconhecer de maneira sistemática aquilo que efetivamente contribui para a criação de valor ou, ao contrário, representa desperdícios a serem eliminados (SMITH e HAWKINS, 2004).

O aprimoramento contínuo do fluxo de informações, materiais e pessoas constitui outro elemento essencial, pois acelera os processos de geração de valor por meio da eliminação de etapas redundantes e falhas de comunicação. A adoção da lógica pull, por sua vez, aplica-se à gestão de estoques de peças sobressalentes, ao relacionamento com fornecedores e ao alinhamento da manutenção com as demais áreas da empresa, priorizando intervenções nos equipamentos que se encontram em operação direta na linha de produção (PMI, 2012). No que diz respeito à busca pela perfeição, destaca-se a importância de estimular a equipe de manutenção a adotar uma postura proativa e comprometida com a melhoria permanente, utilizando metodologias estruturadas que promovam práticas eficazes e atitudes voltadas à prevenção.

A inovação contínua deve ser considerada um princípio orientador, uma vez que a constante atualização tecnológica proporciona recursos mais simples, econômicos e eficazes, contribuindo para identificar oportunidades de evolução na gestão dos ativos e colaborar de forma integrada com outras funções organizacionais (ALMEIDA, 2015). Dessa forma, qualquer atividade desenvolvida no âmbito da manutenção precisa ser concebida como um produto final dentro da cadeia de valor, devendo atender aos requisitos de qualidade, confiabilidade e eficiência esperados pelo cliente interno e pela organização como um todo.

Como forma de complementar o trabalho de revisão bibliográfica, foram pesquisados três estudos de caso de implementação do *Lean Manufacturing* na manutenção industrial. Essa abordagem permitiu observar de forma concreta como os conceitos teóricos se traduzem em práticas operacionais, bem como analisar os resultados efetivos obtidos, como aumento da eficiência, redução de falhas e otimização de recursos. A análise desses casos proporciona uma visão mais abrangente da aplicabilidade das metodologias, permitindo compreender desafios, estratégias de adaptação e impactos reais no desempenho dos equipamentos e processos, enriquecendo, assim, a fundamentação teórica do trabalho.

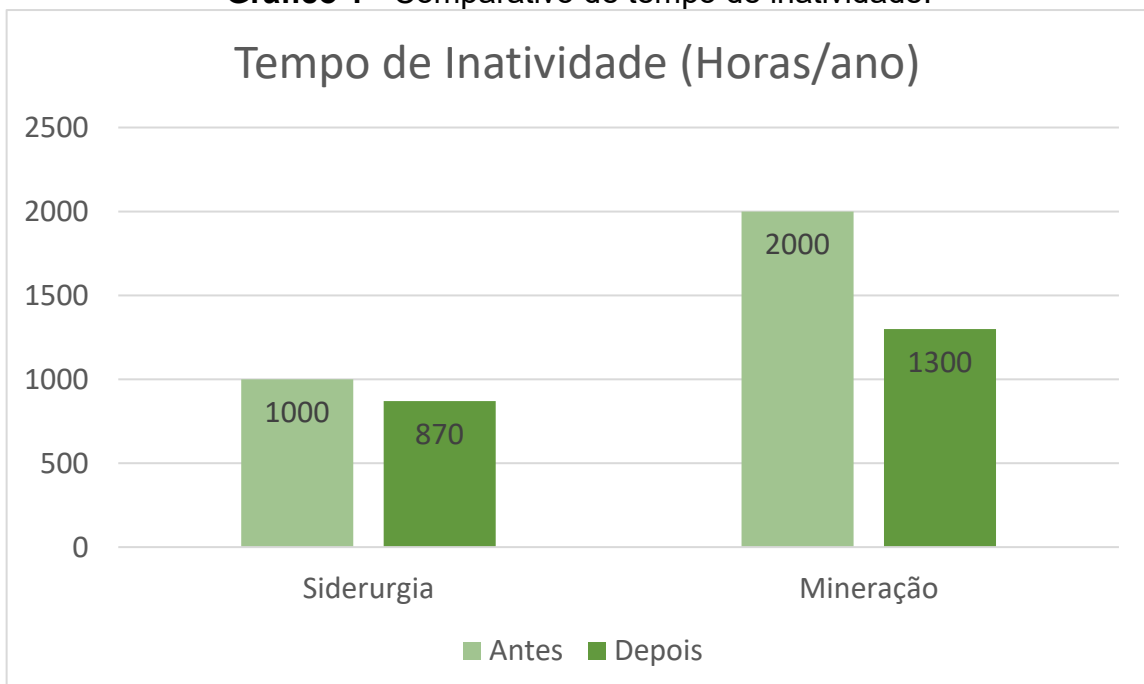
Conforme o primeiro estudo de caso, realizado em uma siderúrgica brasileira, apresentado por Silva *et al.* (2019), a aplicação combinada de práticas Lean resultou em avanços expressivos no desempenho da área de manutenção. Os autores relataram que, após a implementação dessas metodologias, observou-se uma redução de aproximadamente 13% no tempo médio das intervenções corretivas, refletindo maior agilidade das equipes e melhor organização dos recursos. Além disso,

foi possível alcançar uma diminuição de 18% no custo anual destinado às atividades de manutenção, evidenciando o potencial do *Lean Manufacturing* para otimizar processos, eliminar desperdícios e gerar economia direta para a organização.

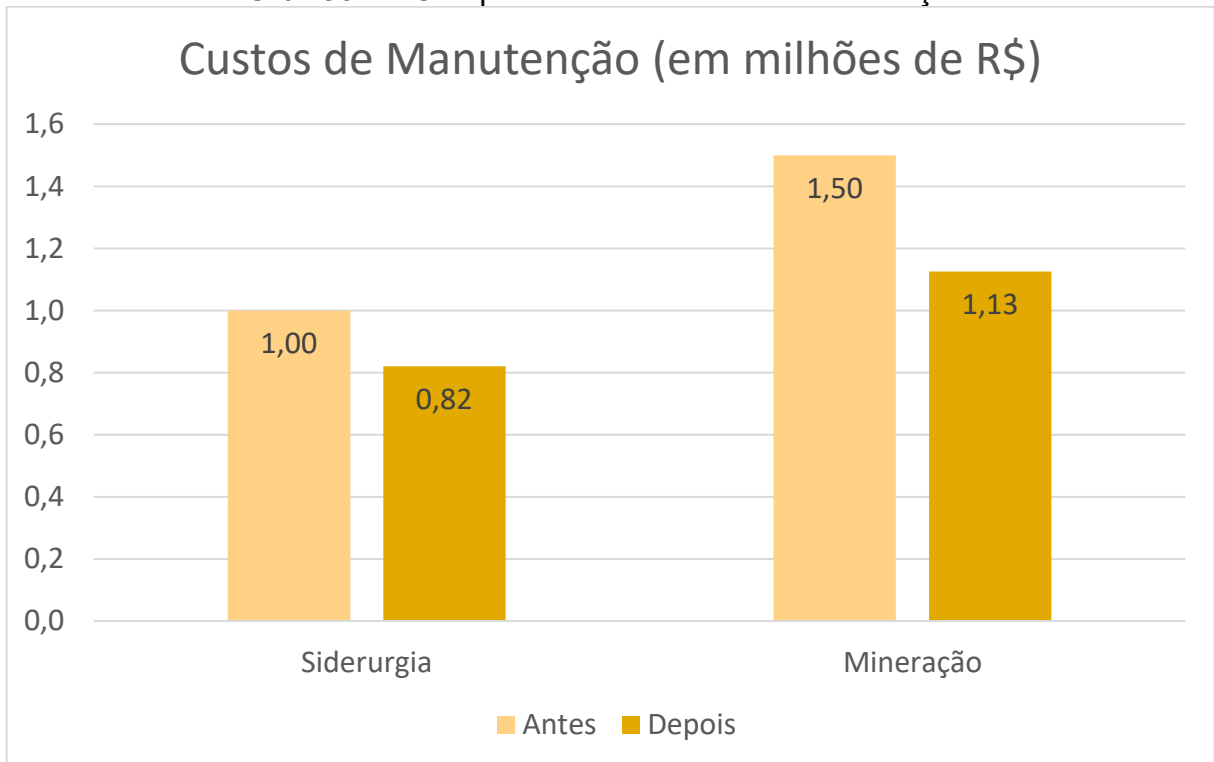
Resultados semelhantes foram constatados em uma mineradora australiana, conforme o estudo divulgado pela consultoria TXM Lean Solutions (2020). Nesse caso, a implantação de rotinas Lean direcionadas especificamente ao setor de manutenção de equipamentos móveis possibilitou uma redução significativa de 35% nas horas dedicadas a reparos emergenciais, contribuindo para elevar a previsibilidade operacional e reduzir interrupções inesperadas na produção. Outro impacto relevante foi o aumento de 22% no índice de cumprimento do planejamento de manutenção preventiva, demonstrando que a padronização de processos, o uso de indicadores e o envolvimento dos colaboradores podem promover ganhos substanciais em disponibilidade, produtividade e confiabilidade dos ativos. Tais evidências corroboram a relevância da adoção do *Lean Manufacturing* como estratégia não apenas produtiva, mas também como prática consolidada na gestão da manutenção industrial.

Os Gráficos 1, 2 e 3 apresentam as comparações dos indicadores de desempenho antes e depois da implementação do *Lean Manufacturing* no setor de manutenção, com os dados dos dois estudos de caso citados anteriormente.

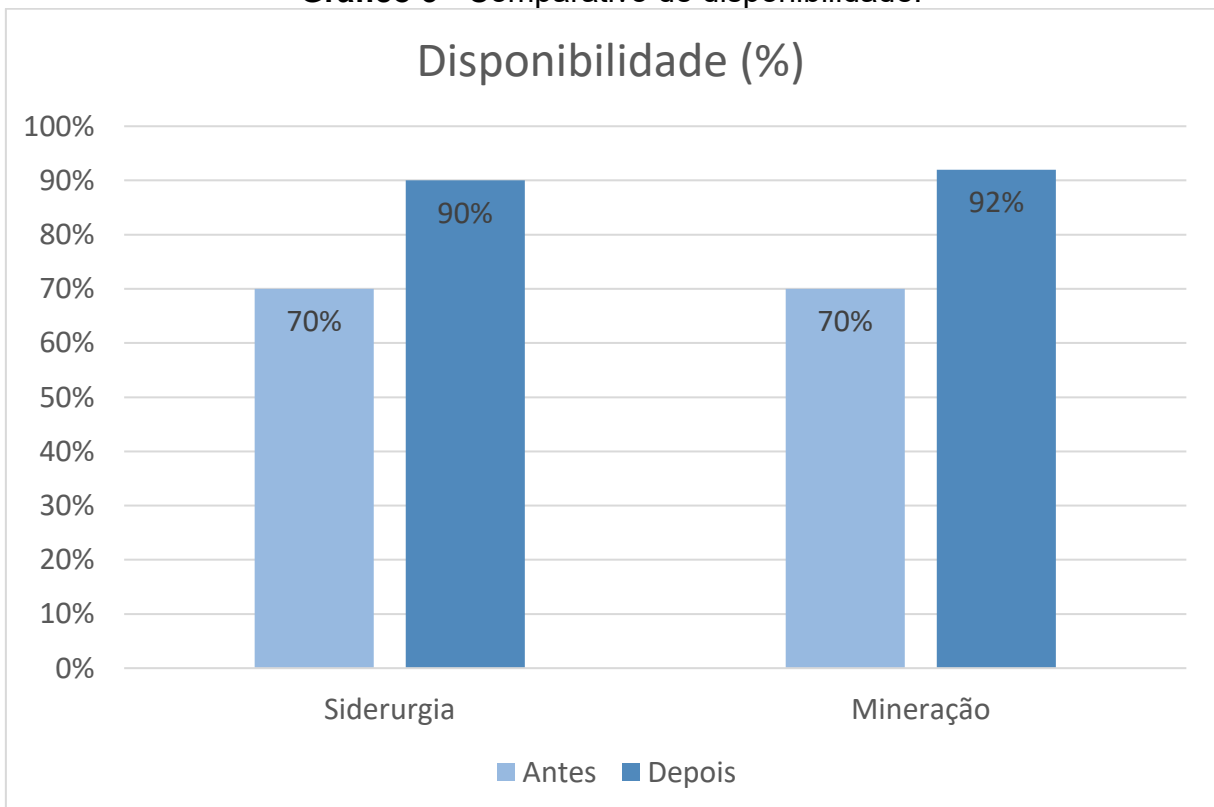
Gráfico 1 - Comparativo de tempo de inatividade.



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2019) e TXM Lean Solutions (2020)

Gráfico 2 - Comparativo de custos de manutenção.

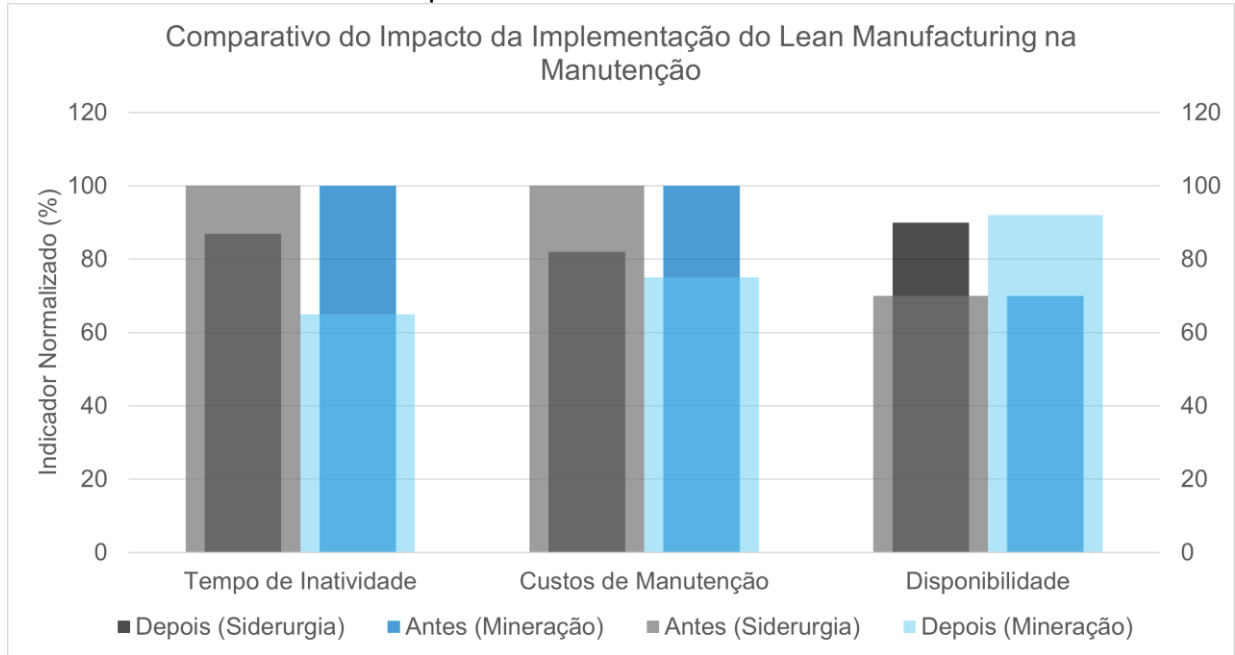
Fonte: Adaptado de Silva et al. (2019) e TXM Lean Solutions (2020).

Gráfico 3 - Comparativo de disponibilidade.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2019) e TXM Lean Solutions (2020).

Os dados apresentados foram consolidados no Gráfico 4 e normalizados a partir de informações quantitativas e qualitativas reportadas por Silva et al. (2019) e TXM Lean Solutions (2020), com o objetivo de facilitar a comparação visual dos principais indicadores antes e depois da aplicação do *Lean Manufacturing* na manutenção.

Gráfico 4 - Comparativo consolidado dos estudos de caso.



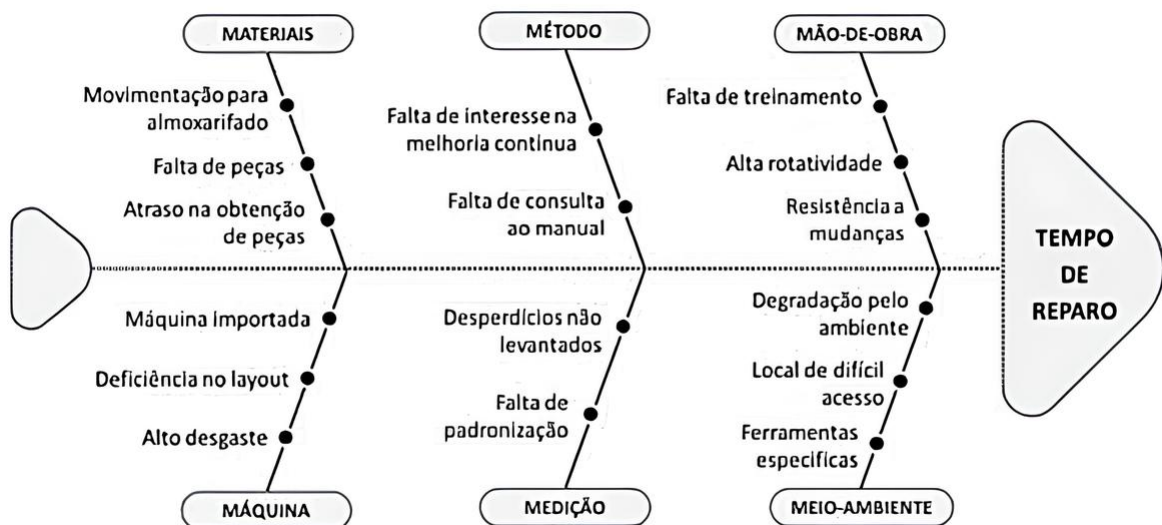
Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2019) e TXM Lean Solutions (2020).

Observa-se a redução dos tempos de inatividade e dos custos de manutenção, além do aumento da disponibilidade dos equipamentos, demonstrando os benefícios obtidos após a adoção das práticas Lean.

Um outro exemplo prático de sucesso da aplicação do *Lean Manufacturing* ocorre no estudo de caso da aplicação do *Lean Manufacturing* na manutenção da Mesa Bottero-M250 (SALES, 2024), um equipamento que efetua cortes de chapas de vidro. A aplicação das ferramentas Lean nesse contexto foi fundamental para otimizar o processo de manutenção e garantir um aumento significativo na confiabilidade da máquina. A análise do desempenho da manutenção incluiu a utilização de ferramentas como o Diagrama de Ishikawa, a Matriz GUT e o Fluxograma do Plano de Manutenção, cada uma delas desempenhando um papel importante na identificação e eliminação de desperdícios.

Inicialmente, O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito, foi utilizado para identificar as causas raízes dos problemas recorrentes na operação da Mesa Bottero-M250. Ao organizar visualmente as causas de falhas, a equipe foi capaz de implementar soluções mais eficazes e evitar que os mesmos problemas se repetissem, promovendo a melhoria contínua, um princípio fundamental do *Lean Manufacturing*. A Figura 10 exemplifica as principais causas encontradas para os problemas recorrentes na mesa de corte.

Figura 6 - Diagrama de Ishikawa da Mesa Bottero-M250.



Fonte: Sales *et al.*, 2024

Após a identificação das causas raízes, a Matriz GUT foi aplicada para priorizar os problemas e as falhas na Mesa Bottero-M250. Esta ferramenta foi essencial para a definição das ações corretivas e preventivas que necessitavam de maior atenção, garantindo que os recursos de manutenção fossem alocados de maneira eficiente. A priorização dos problemas, com base na gravidade, urgência e tendência, como pode ser visto na tabela 2, ajudou a reduzir falhas repetitivas e otimizou o tempo de intervenção das equipes.

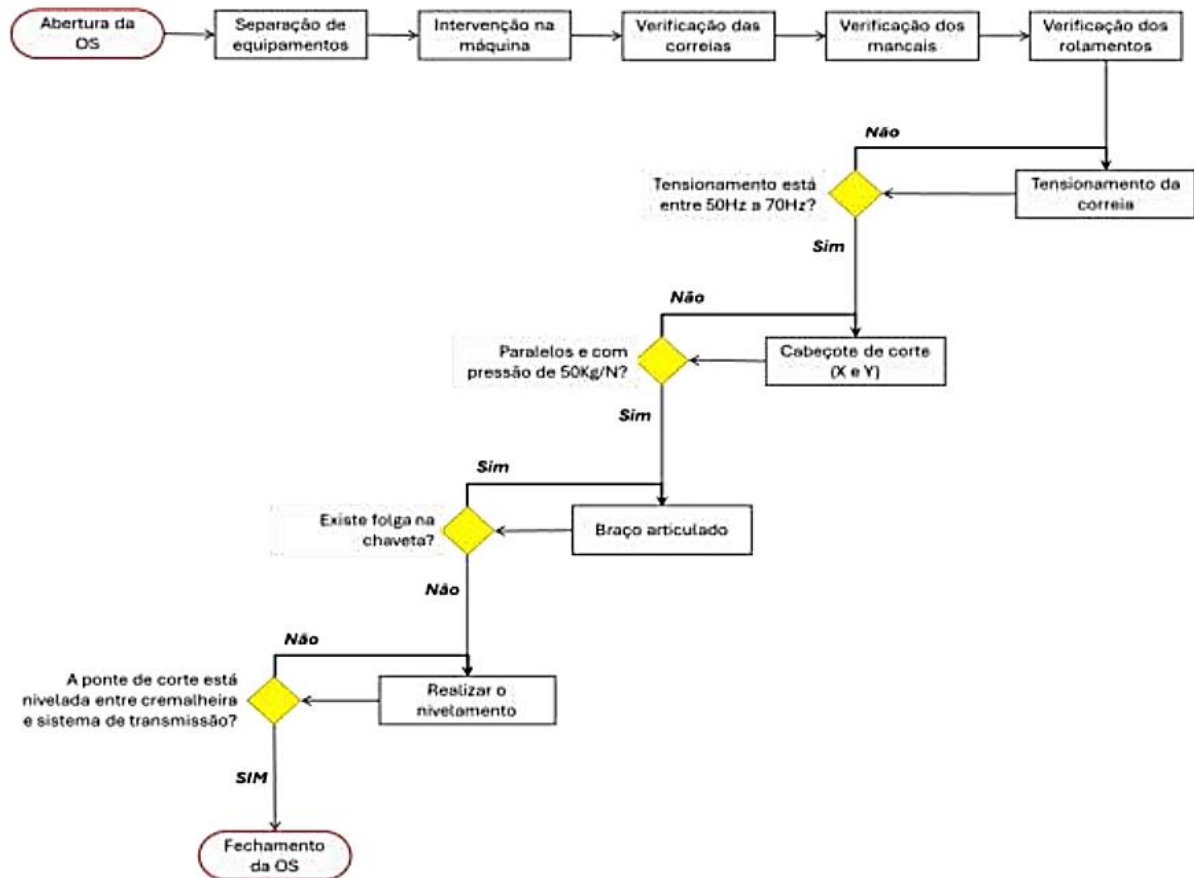
Tabela 1 - Matriz GUT da Mesa Bottero-M250.

| Ranking | Problemas | G | U | T | Total |
|----------------|---|----------|----------|----------|--------------|
| 1º | Falta de padronização | 9 | 8 | 9 | 648 |
| 2º | Falta de treinamento | 9 | 8 | 8 | 576 |
| 3º | Falta de pesquisa no manual de manutenção | 9 | 7 | 8 | 504 |
| 4º | Falta de peças de reposição | 8 | 8 | 7 | 448 |
| 5º | Alto desgaste | 7 | 7 | 9 | 441 |
| 6º | Máquina importada | 7 | 6 | 9 | 378 |
| 7º | Desperdícios no processo não levantados | 7 | 7 | 7 | 343 |
| 8º | Atraso na obtenção de peças | 3 | 7 | 5 | 105 |
| 9º | Localização das ferramentas específicas | 9 | 9 | 1 | 81 |
| 10º | Resistência a mudanças | 5 | 3 | 5 | 75 |
| 11º | Movimentação para o almoxarifado | 6 | 3 | 4 | 72 |
| 12º | Degradação pelo ambiente | 8 | 7 | 1 | 56 |
| 13º | Alta rotatividade de turnos | 5 | 3 | 3 | 45 |
| 14º | Falta de interesse na melhoria contínua | 7 | 5 | 1 | 35 |
| 15º | Local de difícil acesso | 2 | 3 | 3 | 18 |
| 16º | Deficiência no layout | 5 | 1 | 1 | 5 |

Fonte: Sales *et al.*, 2024

Por fim, após a definição das causas raízes e suas prioridades dentro do processo, é possível desenvolver um Fluxograma do Plano de Manutenção para mapear as etapas do processo de manutenção e facilitar a compreensão de todos os envolvidos (MOUBRAY, 1997). Com isso, foi possível garantir que cada etapa do processo estivesse bem definida e que não houvesse redundâncias ou falhas nos fluxos de trabalho. A utilização do fluxograma permitiu aumentar a eficiência das operações e melhorar a comunicação entre as equipes de manutenção, produção e gestão. É possível observar na Figura 11 como foi possível a criação de um fluxo de processos específico e adaptado a realidade do plano de manutenção do equipamento.

Figura 7 – Fluxograma do Plano de Manutenção Mesa Bottero-M250.



Fonte: Sales et al., 2024

Essas ferramentas, Diagrama de Ishikawa, Matriz GUT e Fluxograma de Processos, combinadas ao princípio de Kaizen (melhoria contínua), permitiram que a manutenção da Mesa Bottero-M250 fosse não apenas mais eficiente, mas também proativa, com foco na prevenção e eliminação de desperdícios. O uso dessas metodologias resultou em um aumento significativo na disponibilidade dos equipamentos, redução do tempo de inatividade e menor custo com manutenções corretivas (SALES, 2024).

Entretanto, embora os ganhos sejam expressivos, é importante destacar que a implementação do *Lean Manufacturing* na manutenção apresenta limitações e desafios que não podem ser desconsiderados. Entre os principais pontos críticos, destacam-se:

- A resistência cultural dos colaboradores e gestores em abandonar práticas tradicionais e adotar novos métodos de trabalho.
- O investimento inicial em treinamento, consultoria e adaptação de sistemas, que pode ser elevado.

- A necessidade de disciplina e comprometimento contínuo das equipes para sustentar as práticas Lean ao longo do tempo.
- A dependência de dados confiáveis e atualizados, o que exige sistemas de informação bem estruturados e integração entre áreas.

Para ilustrar esses aspectos de forma didática, apresenta-se o quadro abaixo com uma síntese comparativa dos principais benefícios e desafios identificados na literatura e na prática:

Quadro 1 - Vantagens e desafios da aplicação do Lean Manufacturing na Manutenção Industrial

| Vantagens do Lean na Manutenção | Desafios e Limitações |
|---|---|
| Redução de desperdícios e custos | Resistência cultural à mudança |
| Aumento da confiabilidade e disponibilidade dos ativos | Investimento inicial em capacitação e sistemas |
| Melhoria da comunicação entre setores | Necessidade de disciplina na execução e monitoramento |
| Padronização de rotinas e processos | Exigência de dados precisos e integração com sistemas de gestão |
| Engajamento dos colaboradores e foco na melhoria contínua | Dificuldade na adaptação a ambientes produtivos complexos |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A discussão dos resultados evidencia que o *Lean Manufacturing*, quando implementado com planejamento e apoio gerencial, é capaz de proporcionar ganhos substanciais em desempenho operacional e redução de custos. Entretanto, para garantir resultados sustentáveis, é necessário considerar cuidadosamente as características da empresa, o grau de maturidade organizacional e os recursos disponíveis.

Considerando os pontos levantados pelo estudo e analisando detalhadamente os principais elementos relacionados à manutenção, à produção, ao *Lean Manufacturing* e suas ferramentas, bem como os dados e resultados apresentados nos estudos de caso, observa-se que os desafios e limitações na implementação do Lean na manutenção industrial evidenciam a necessidade de um

processo unificado de aplicação. Com essa padronização, seria possível aprimorar a compreensão de cada etapa do fluxo de implementação da metodologia, considerando a diversidade de atividades mantenedoras existentes nos diferentes setores da indústria brasileira.

Com base nesse entendimento, este estudo elaborou uma cartilha de apoio para a aplicação do *Lean Manufacturing* na Manutenção Industrial, estruturada por meio de um fluxograma de processos. O material, apresentado como apêndice, oferece uma orientação prática e condensada para empresas e responsáveis que desejam implementar a metodologia, transformando os ganhos observados nos estudos de caso em um guia operacional sobre o uso das ferramentas citadas.

É importante salientar que não há garantias de que os resultados apresentados nos estudos de caso serão plenamente replicados com a aplicação da cartilha; o material tem caráter orientativo, servindo como guia para empresas que buscam melhorias. Além disso, destaca-se a necessidade de realizar previamente um levantamento detalhado dos gargalos e perdas existentes no setor de manutenção, bem como considerar as particularidades do ramo industrial e a capacitação do corpo técnico. Dependendo dos resultados dessa análise preliminar, a implementação da metodologia e os custos associados podem tornar-se inviáveis frente aos benefícios esperados, tornando desnecessária a adoção da ferramenta.

Por fim, vale ressaltar que o alinhamento do *Lean Manufacturing* com tecnologias da Indústria 4.0 potencializa ainda mais seus benefícios, sobretudo no monitoramento em tempo real, na análise preditiva de falhas e na integração dos processos produtivos e de manutenção. Essa combinação representa uma oportunidade estratégica para empresas que desejam se manter competitivas em um mercado dinâmico e altamente exigente.

5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou, por meio de uma revisão bibliográfica ampla e fundamentada, que a aplicação dos princípios do *Lean Manufacturing* na gestão da manutenção industrial representa uma estratégia eficaz para melhorar a eficiência operacional, reduzir desperdícios e aumentar a confiabilidade e a disponibilidade dos ativos. A incorporação de ferramentas e metodologias como *Total Productive Maintenance* (TPM), *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), *Kanban* e *Just in Time* mostrou-se fundamental para transformar práticas de manutenção predominantemente corretivas em processos mais enxutos, padronizados e orientados pela cultura da melhoria contínua, tão necessária no contexto dinâmico da Indústria 4.0.

Os resultados observados na literatura indicam ganhos expressivos, incluindo redução do tempo de inatividade de até 35%, diminuição de custos operacionais em cerca de 20% e maior integração entre áreas produtivas e equipes de manutenção. Tais benefícios, no entanto, não se concretizam de maneira imediata, pois a implementação efetiva do *Lean Manufacturing* depende do alinhamento estratégico da organização, da superação de resistências culturais e da formação de profissionais capacitados para conduzir as mudanças necessárias.

Ainda que a revisão tenha evidenciado avanços significativos, persistem desafios relevantes, entre eles a dificuldade de adaptação de pequenas e médias empresas às práticas Lean, a necessidade de investimentos iniciais em treinamento e tecnologias de suporte, e a complexidade de integrar sistemas digitais com processos operacionais tradicionais. Esses fatores reforçam a importância de uma abordagem gradual e planejada, considerando a maturidade organizacional e os recursos disponíveis em cada contexto.

Como contribuição prática, este trabalho oferece um panorama consolidado das principais experiências, benefícios e limitações do uso do *Lean Manufacturing* aplicado à manutenção industrial, podendo servir como referência para gestores, profissionais e acadêmicos interessados no tema. Foram apresentados e analisados os principais tipos de manutenções aplicados na indústria, identificando as possibilidades de melhoria através da utilização dos princípios e ferramentas do *Lean Manufacturing*. Além disso, os estudos de caso discutidos propiciaram a visão prática da implementação, trazendo dados, vantagens e dificuldades dessa operação, sendo

fundamental para a elaboração de um material de recomendação para a aplicação do *Lean Manufacturing* à Manutenção Industrial.

Ainda assim, a natureza exploratória da pesquisa aponta para a necessidade de investigações adicionais que possam aprofundar o conhecimento sobre a aplicação real dessa filosofia no ambiente produtivo. Nesse sentido, recomenda-se que estudos futuros contemplem:

- A realização de estudos de caso em empresas brasileiras de diferentes portes e segmentos industriais, com o objetivo de validar empiricamente os benefícios e identificar barreiras específicas à implementação do Lean na manutenção.
- A criação de modelos integrados que unam o Lean Manufacturing às tecnologias digitais da Indústria 4.0, englobando sistemas de monitoramento em tempo real, análise preditiva de falhas e gestão automatizada de métricas de desempenho.
- A análise do impacto do *Lean Manufacturing* sobre aspectos sociais e culturais, como o engajamento das equipes, o clima organizacional e a percepção de valor dos colaboradores em relação às mudanças propostas.
- A investigação de métricas e indicadores de desempenho mais sensíveis, capazes de capturar os ganhos em produtividade e qualidade decorrentes da aplicação das práticas enxutas na manutenção.
- O estudo comparativo entre diferentes metodologias de melhoria contínua, como Lean, Seis Sigma e TPM, para avaliar suas complementaridades e definir estratégias combinadas de maior eficácia.

Em um contexto produtivo cada vez mais dinâmico e digital, integrar a filosofia Lean à gestão da manutenção representa não apenas uma vantagem competitiva, mas também uma necessidade estratégica, determinando a capacidade das organizações de se adequarem às demandas da Indústria 4.0. Nesse contexto, integrar práticas Lean com tecnologias emergentes, como monitoramento inteligente de ativos, análise preditiva e sistemas ciberfísicos, torna-se essencial para elevar a confiabilidade dos processos, reduzir desperdícios de maneira contínua e fortalecer uma cultura de melhoria permanente. Assim, as empresas que investirem de forma consistente na combinação desses conceitos estarão mais preparadas para sustentar níveis superiores de eficiência operacional, qualidade e inovação, consolidando seu posicionamento no mercado global.

6 REFERÊNCIAS

ABDI – AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. *Lean Manufacturing* na indústria brasileira: estudo de casos e resultados obtidos. Brasília: ABDI, 2021. Disponível em: <https://www.abdi.com.br>. Acesso em: 13 maio 2024.

ABERDEEN GROUP. The cost of downtime. Boston: Aberdeen Group, 2021. Disponível em: <https://www.aberdeen.com>. Acesso em: 1 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 5462: 1994. Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

AHUJA, I. P. S.; KHAMBA, J. S. Total productive maintenance: literature review and directions. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 25, n. 7, p. 642–658, 2008.

AL-NAJJAR, B. Maintenance planning and optimization: a strategy for cost reduction and improvement of maintenance performance. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 3, n. 1, p. 25–31, 1997.

ALMEIDA, F. Manutenção preditiva: a importância para a gestão de ativos industriais. São Paulo: Atlas, 2015.

ALMEIDA, F.; SOUZA, L. F.; REIS, M. C. *Lean Manufacturing* e manutenção: uma análise integrada de práticas e resultados em empresas industriais. **Revista Produção Online**, v. 22, n. 4, p. 1290–1311, 2022.

CAMPOS, Vicente Falconi. *TQC: Controle da qualidade total (no estilo japonês)*. 5. ed. Nova Lima: Falconi Consultores de Resultado, 2004.

CARVALHO, Cleginaldo Pereira de; LEITE, Luiz Edvaldo. Application of *Lean Manufacturing* to Reduce Unproductive Times in a Valve Spring Inspection and

Packaging Cell. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 8, n. 2, p. 305–323, fev. 2021. DOI: 10.22161/ijaers.82.39.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. A. Metodologia científica. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Sondagem especial: gestão da manutenção industrial no Brasil. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br>. Acesso em: 3 jul. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Brussels: Directorate-General for Research and Innovation, Jan. 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industry-2021-jan-07_en. Acesso em: 26 jul. 2025.

DE OLIVEIRA, A. S.; VIANA, B. C.; ROBERTO, J. C. A.; SOUTO, S. P. Aplicação da metodologia *Lean Manufacturing* a gestão da manutenção industrial. **Revista de Gestão e Secretariado**, [S. l.], v. 14, n. 6, p. 8997–9018, 2023.

GUPTA, Ashok; BOYER, Robert. Total Productive Maintenance & *Lean Manufacturing*. New York: McGraw-Hill, 2009.

HARRINGTON, H. James. Business Process Improvement: The breakthrough strategy for total quality, productivity, and competitiveness. New York: McGraw-Hill, 1991.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios. In: Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences. Koloa: IEEE, 2016.

HINES, P.; TAYLOR, D. Going lean: a guide to implementation. London: Palgrave Macmillan, 2000.

HINES, P.; HOLWEG, M.; RICH, N. *Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking*. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 24, n. 10, p. 994–1011, 2004.

JARDINE, A. K. S.; TSANG, A. H. C.; KAPLAN, A. L. *The value of predictive maintenance*. Dordrecht: Springer, 2006.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: securing the future of German manufacturing industry*. Munich: Acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013.

KELLY, A. *Maintenance management: a new approach*. 3. ed. London: Pitman Publishing, 2006.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. *Fundamentos de metodologia científica*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

LASI, H. et al. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014.

LIKER, J. K. *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. New York: McGraw-Hill, 2004.

LOPES, Ricardo; SILVA, Mariana. *Indústria 4.0 e Lean Manufacturing: integração para eficiência produtiva*. São Paulo: Atlas, 2020.

MONCHY, S. *Manutenção industrial: um enfoque estratégico para a competitividade*. Rio de Janeiro: FGV, 1987.

MOUBRAY, J. *Reliability-centered maintenance*. New York: Industrial Press, 1997.

NAKAJIMA, S. *Total productive maintenance: the Japanese approach to continuous improvement*. Cambridge: Productivity Press, 1988.

NAKAZATO, K. Manual de Implementação do TPM. Nagoya: JIPM, Japan Institute of Plant Maintenance, 1999.

OHNO, T. Toyota production system: beyond large-scale production. Portland: Productivity Press, 1988.

PERIN, Cláudio. Indústria 4.0: revoluções industriais. Disponível em: <https://claudioperin.com.br/industria-4-0-qual-o-grau-de-maturidade-digital-da-sua-empresa/industria-4-0-revolucoes-industriais/>. Acesso em: 19 jul. 2025.

PINTO, J. Manutenção Lean. 4. ed. Lisboa: Lidel, 2013.

PMI. Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK). 4. ed. Pensilvânia: Project Management Institute, 2012.

POÓR, Peter; ŽENÍŠEK, David; BASL, Josef. Historical overview of maintenance management strategies: development from breakdown maintenance to predictive maintenance in accordance with four industrial revolutions. In: EUROPEAN INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 3., 2019, Pilsen. Proceedings [...]. Pilsen: IEOM Society International, 2019.

SALES, Douglas Rodrigues de et al. APLICAÇÃO DO *LEAN MANUFACTURING* NA MANUTENÇÃO DA MESA BOTTERO-M250. **Revista H-TEC Humanidades e Tecnologia**, v. 8, n. 01, p. 71-94, 2024.

SANTOS, R. F.; MARTENS, C. D. P. Indústria 4.0 no Brasil: uma análise da produção científica nacional. **Revista Gestão Industrial**, v. 15, n. 2, p. 70–90, 2019.

SCHWAB, K. The fourth industrial revolution. Geneva: World Economic Forum, 2016.

SENSEYE. The true cost of downtime. Hampshire: Senseye Ltd., 2020. Disponível em: <https://www.senseye.io/whitepapers/the-true-cost-of-downtime>. Acesso em: 1 jul. 2025.

SEVERINO, A. J. Metodologia do trabalho científico. 23. ed. São Paulo: Cortez, 2017.

SIQUEIRA, J. A. Gerenciamento de manutenção industrial. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

SILVA, A. A.; DIAS, J. C.; VIEIRA, G. E.; ARAGÃO, A. R. Avaliação da implementação de *Lean Manufacturing*: estudo de caso no setor de manutenção de uma siderúrgica de grande porte. **South American Development Society Journal**, v. 5, n. 14, p. 148–171, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/335846694>. Acesso em: 5 jul. 2025.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. Administração da Produção. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; BURGESS, N. *Operações e produção: estratégia e gestão de operações*. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

SMITH, R.; HAWKINS, B. Lean maintenance: reduce costs, improve quality and increase market share. Oxford: Butterworth Heinemann, 2004.

SULLIVAN, D. J. A study of Overall Equipment Effectiveness (OEE) as a performance indicator. **Manufacturing Engineering**, v. 97, n. 6, p. 21–28, 1986.

SUTTON, R. I. The OEE and TPM connection: a practical guide to improving productivity. New York: McGraw-Hill, 1994.

TAVARES, F. História e evolução da manutenção industrial. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

TSANG, A. H. C. Productivity and performance improvement in maintenance. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 8, n. 2, p. 59–72, 2002.

TXM LEAN SOLUTIONS. Lean Maintenance Reduces Breakdown Maintenance and Improves Availability. Case Study, 2020. Disponível em: <https://txm.com/case-studies/solution/lean-maintenance/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

WANG, Y. H.; LEE, D. Total productive maintenance: a study of the factors affecting its implementation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 18, n. 1, p. 33–40, 2001.

WIREMAN, T. Maintenance planning and scheduling handbook. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation. New York: Simon & Schuster, 1996.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. The machine that changed the world: the story of Lean production. New York: HarperPerennial, 1990.

7. APÊNDICE – CARTILHA DE APOIO A IMPLEMENTAÇÃO DO LEAN MANUFACTURING APLICADO À MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

CARTILHA DE APOIO: LEAN MANUFACTURING NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

A aplicação do Lean Manufacturing na manutenção industrial aumenta a eficiência, reduz desperdícios e paradas de equipamentos, otimiza recursos e custos, e fortalece a confiabilidade dos processos, promovendo uma manutenção ágil, organizada e orientada à melhoria contínua.

Fluxograma de Implementação



Orientações Práticas

- Padronização de processos e atividades
- Avaliação de particularidades da operação
- Custos e viabilidade

Notas Importantes

- Análise prévia do contexto da manutenção
- Capacitação do corpo técnico e colaboradores

PONTOS CRÍTICOS

- Estudo de Viabilidade: análise prévia é essencial, pois a implementação pode ser inviável.
- Resistência à mudança: hábitos antigos dificultam a adoção do Lean.
- Falta de padronização: processos não claros impedem melhorias contínuas.
- Deficiência de dados: decisões sem informações confiáveis comprometem resultados.
- Integração limitada: falhas na comunicação entre manutenção e produção geram retrabalho.

*Resultados não são garantidos; a cartilha serve como guia orientativo para empresas que buscam melhorias.