

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS
NÍVEL MESTRADO**

VANDERLEI AMORIM DA SILVA

**MENSURAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO: ESTUDO DE
CASO NO SUPERMERCADO DE UMA COOPERATIVA**

**São Leopoldo
2025**

VANDERLEI AMORIM DA SILVA

**MENSURAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO: ESTUDO DE
CASO NO SUPERMERCADO DE UMA COOPERATIVA**

Qualificação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Miguel Afonso Sellitto

São Leopoldo

2025

S586m Silva, Vanderlei Amorim da.
Mensuração da eficiência em serviços de manutenção : estudo de caso no supermercado de uma cooperativa / Vanderlei Amorim da Silva. – 2025.
79 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, 2025.

“Orientador: Prof. Dr. Miguel Afonso Sellitto”.

1. Eficiência organizacional – Avaliação. 2. Serviços de manutenção. 3. Estudo de caso. 4. Supermercado – Cooperativa.
I. Título.

CDU 658.5:004

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster Ditbenner – CRB 10/2517)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases do protocolo Prisma.....	22
Figura 2 – Nuvem de palavras formada com as palavras chaves dos artigos avaliados.....	24
Figura 3 – Etapas metodológicas da pesquisa.....	43
Figura 4 – Separação em três clusters por dendrograma	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Atributos de acordo com o protocolo PICOC.....	21
Quadro 2 – Autores dos artigos, objetivo e método utilizado na pesquisa	24
Quadro 3 – Principais contribuições dos estudos avaliados	32
Quadro 4 – Blocos de padrões das DMUs baseados nas folgas	60
Quadro 5 – Padrões identificados durante a análise do Benchmarking	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de artigos publicados por ano	23
Tabela 2 – Equipamentos avaliados no estudo.....	45
Tabela 3 – Indicadores individuais de manutenção.....	46
Tabela 4 – Ranking das DMUs segundo o score de eficiência	49
Tabela 5 – Folga dos indicadores para o alvo.....	52
Tabela 6 – Resultados de Benchmarking (λ) em relação às DMUs eficientes	55

LISTA DE SIGLAS

Sigla	Significado
AHP	Analytic Hierarchy Process
CBM	Condition-Based Maintenance
DEA	Data Envelopment Analysis
DEMATEL	Decision Making Trial and Evaluation Laboratory
DT	Gêmeos Digitais
FIS	Fuzzy Inference System
GA	Genetic Algorithms
IA	Inteligência Artificial
ICD	Indicadores-Chave de Desempenho
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet das Coisas
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
MRQA	Maintenance Reporting Quality Assessment
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OS	Ordem de Serviço
PICOC	Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context
PLAS	Project Leader Assessment System
PMC	Performance Monitoring Center
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RA	Realidade Aumentada
RRW	Risk Reduction Worth
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SMR	Sistema de Manutenção e Reparo
TLS	Transport Layer Security

TPM	Total Productive Maintenance
TS	Tabu Search
TTI	Tempo Total de Inatividade
UCD	User-Centered Design
USBM	Unit Slacks-Based Measure
VFM	Value for Money
VIKOR	VišeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje
λ	lambda, coeficiente DEA de referência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	10
1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA	12
1.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.4 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	17
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2 ARTIGO 1 - EFICIÊNCIA E INTELIGÊNCIA NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA E ELEMENTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS PARA GESTÃO.....	18
2.1 INTRODUÇÃO	18
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
2.2.1 Protocolo PIPOC	20
2.2.1 Protocolo Prisma.....	22
2.3 RESULTADOS	23
2.3.1 Objetivos dos estudos e métodos utilizados.....	24
2.3.1 Principais resultados dos estudos avaliados.....	28
2.3.1 Principais contribuições teóricas e práticas dos estudos avaliados	32
2.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	34
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
2.6 REFERÊNCIAS	37
3 ARTIGO 2 – MENSURAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO COM APOIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS: EVIDÊNCIAS DE UM ESTUDO DE CASO NO SUPERMERCADO DE UMA COOPERATIVA.....	40
3.1 INTRODUÇÃO	40
3.2 MATERIAIS E MÉTODO	43
3.2.1 Contextualização da eficiência em manutenção	44
3.2.2 Amostra e Período de Estudo	45
3.2.3 Modelagem e Validação do Modelo DEA.....	46
3.3 RESULTADOS	49
3.3.1 Aplicação do DEA e Ranking de DMUs	49
3.3.2 Análise dos alvos e folgas para os indicadores individuais	52
3.3.3 Análise dos benchmarkings	55

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
3.6 REFERENCIAS	63
4 DISCUSSÃO, LIÇÕES APRENDIDAS E IMPLICAÇÕES DA PESQUISA	67
4.1 SÍNTESE INTEGRADA DOS ACHADOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO DA MENSURAÇÃO DE EFICIÊNCIA.....	67
4.2 IMPLICAÇÕES PARA A PRÁTICA E LIÇÕES APRENDIDAS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO.....	68
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA	70
REFERÊNCIAS.....	72
APÊNDICE A – PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA ..	77

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção são apresentadas a contextualização, justificativa do tema de pesquisa, o problema a ser pesquisado, o objetivo geral e específicos e a estrutura da dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Historicamente tratada como função de apoio, a manutenção industrial tem progressivamente assumido papel central nas estratégias organizacionais. Com a evolução das tecnologias produtivas e o aumento da competitividade global, sua importância passou a ser reconhecida não apenas pela capacidade de evitar falhas, mas também por sua influência na redução de custos, na segurança operacional e na sustentabilidade dos processos (Marques; Brito, 2019; Farias, 2024). A transformação do papel da manutenção está ligada à incorporação de tecnologias digitais, à organização de processos decisórios e à necessidade de respostas rápidas frente à degradação de desempenho de ativos.

A literatura internacional indica que a manutenção moderna ultrapassa o escopo de intervenções corretivas, incorporando estratégias preventivas, preditivas e prescritivas, apoiadas em soluções como inteligência artificial (IA), internet das coisas (IoT), gêmeos digitais e realidade aumentada (Rücker *et al.*, 2025; Tyagi *et al.*, 2024). Essas tecnologias se alinham aos paradigmas da Indústria 4.0, que privilegiam a integração homem-máquina e a tomada de decisão com base em dados em tempo real (Xu *et al.*, 2025).

A eficiência das ações de manutenção é resultado de múltiplos fatores, incluindo a criticidade dos ativos, a estratégia adotada, o perfil e a qualificação das equipes e as condições operacionais do ambiente. Muitas dessas variáveis são analisadas de forma isolada, sem considerar sua interdependência. Como apontam Lu *et al.* (2025), alcançar eficiência na manutenção exige mais do que algoritmos sofisticados: é necessário alinhar estruturas organizacionais e capacidades cognitivas à complexidade das operações.

A revisão realizada no escopo desta pesquisa evidenciou a presença de diversas publicações sobre manutenção industrial. Entretanto, os estudos que propõem abordagens amplas para gestão da manutenção — e especialmente para a

medição da eficiência — ainda são limitados (Liu *et al.*, 2024; Shao; Kumral, 2025). Na maioria das vezes, estas são tratadas apenas como executoras de planos predefinidos, desconsiderando seu papel estratégico na adaptação das intervenções às condições reais (Askari *et al.*, 2025).

O contexto das cooperativas agroindustriais e redes varejistas reforça a relevância dessa discussão. Nessas organizações, a manutenção eficiente garante a operação de pontos de venda e centros de distribuição, evitando interrupções que comprometem o abastecimento e a experiência do cliente (Segi; Kobayashi; Matsushima, 2024). A cooperativa, por exemplo, atua na produção, industrialização, beneficiamento de grãos e comercialização de produtos agropecuários, operando também no ramo varejista com supermercados, postos de combustíveis, peças agrícolas e home centers com unidades em diferentes localidades. A eficiência da manutenção é essencial para assegurar a continuidade operacional, otimizar o desempenho dos ativos e atender às demandas específicas de seus múltiplos segmentos, sejam eles industriais ou comerciais.

No segmento varejista, a disponibilidade e o funcionamento de equipamentos como sistemas de refrigeração, balcões de atendimento, câmaras frias, balanças, checkouts e sistemas de climatização são determinantes para garantir a qualidade dos produtos e atender à demanda do consumidor. A indisponibilidade desses ativos pode gerar perdas diretas de vendas, deterioração de perecíveis e insatisfação do cliente, com impactos potenciais na fidelização e na imagem institucional (Xu; Guo; Rodgers, 2020). Já nas operações industriais e de armazenagem, a manutenção eficaz assegura a continuidade de processos como secagem, beneficiamento e estocagem de grãos, além do funcionamento de máquinas e sistemas logísticos.

Nesses ambientes, falhas não planejadas podem comprometer etapas críticas da produção e do atendimento ao cliente. Por isso, a manutenção deve ser gerida de forma estruturada, considerando a integração entre aspectos técnicos, organizacionais e humanos. Estudos como o de Akinbogun, Kayode e Oyedokun (2024) ressaltam que, no varejo, a manutenção é parte da estratégia de experiência do consumidor, influenciando a percepção de confiabilidade e a segurança do ambiente de compra.

A mensuração da eficiência da manutenção, nesse cenário, é fundamental para identificar boas práticas, otimizar recursos e direcionar esforços de melhoria. Essa avaliação deve ir além da análise de disponibilidade de ativos, contemplando

indicadores como tempo de inatividade de equipamentos críticos, impacto na disponibilidade de produtos e tempo médio de recuperação de falhas. Ao integrar esses elementos em um método estruturado, é possível alinhar as ações de manutenção aos objetivos estratégicos da organização e fortalecer a competitividade em mercados que exigem alta confiabilidade operacional.

Assim, a presente pesquisa parte do reconhecimento de que a manutenção não é apenas uma função de suporte técnico, mas um componente estratégico para a continuidade das operações e para a satisfação do cliente, especialmente em supermercados. Ao contextualizar a importância da gestão estruturada da manutenção e a necessidade de medir a eficiência de suas equipes, estabelece-se a base para as discussões e justificativas desenvolvidas nas seções seguintes desta dissertação.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A manutenção, seja corretiva, preventiva, preditiva ou prescritiva, constitui uma função essencial para garantir a continuidade operacional e a eficiência das organizações. Sua contribuição abrange desde a preservação da disponibilidade dos ativos até a redução de custos decorrentes de paradas não programadas e falhas operacionais, aspectos amplamente documentados pela literatura (Marques; Brito, 2019; Farias, 2024).

A incorporação de tecnologias digitais, como inteligência artificial (IA), internet das coisas (IoT), realidade aumentada (RA) e gêmeos digitais, tem possibilitado avanços relevantes na forma como os ativos são monitorados, diagnosticados e mantidos (Brik; En-nhaili; Meddaoui, 2025; Rücker *et al.*, 2025; Tyagi *et al.*, 2024). Essas soluções oferecem recursos para prever falhas, otimizar intervenções e apoiar decisões em tempo quase real. Contudo, uma parte dessas iniciativas permanece centrada na melhoria da eficiência técnica de equipamentos específicos, não avançando para a integração entre desempenho de ativos e gestão efetiva das equipes responsáveis por mantê-los em operação.

A revisão sistemática realizada no capítulo 2 identificou que grande parte das publicações se concentram em temas como desenvolvimento de algoritmos, diagnósticos baseados em sinais de vibração, métodos de agendamento inteligente e análises de confiabilidade. Embora relevantes, esses estudos raramente estabelecem

conexões diretas com práticas gerenciais e processos decisórios que envolvem equipes de manutenção atuando em ambientes complexos. A ausência dessa integração limita a compreensão sobre como fatores técnicos e organizacionais interagem para produzir níveis consistentes de eficiência. Identificou-se somente o de Sarfaraz *et al.* (2023), que aplicou a Análise Envoltória de Dados (DEA) combinada a Sistemas de Inferência Fuzzy para avaliar o desempenho de unidades de manutenção no setor de saneamento. Embora robusto em termos metodológicos, o estudo está restrito a um contexto específico — empresas públicas de abastecimento de água — e não se desdobra em um modelo replicável a outros segmentos, como cooperativas e rede varejista. Essa limitação evidencia a necessidade de abordagens adaptadas a diferentes realidades operacionais, contemplando variáveis setoriais, estruturais, logísticas e vendas diretas.

Esse ponto se torna especialmente relevante em organizações com estruturas descentralizadas, como cooperativas e redes varejistas. No caso da cooperativa, em estudo, que atua em segmentos diversos — incluindo a produção e beneficiamento de grãos, industrialização de alimentos, varejo supermercadista, peças agrícolas, home centers e postos de combustíveis —, a gestão da manutenção desempenha papel estratégico para assegurar o funcionamento contínuo de equipamentos essenciais. No ambiente de supermercados, por exemplo, a disponibilidade dos equipamentos da indústria, sistemas de refrigeração, câmaras frias, balanças, checkouts e climatizadores é fundamental para manter a integridade dos produtos, garantir a operação das lojas e atender à demanda dos consumidores.

A indisponibilidade desses ativos pode gerar consequências que vão além das perdas financeiras, mas também a ausência de produtos nas prateleiras, causada por falhas nos equipamentos de armazenamento ou exposição, pode comprometer a satisfação do cliente e sua confiança na organização. Em mercados competitivos, essa experiência negativa influencia diretamente a fidelização, podendo levar à migração para concorrentes. Por outro lado, a manutenção bem estruturada assegura que os produtos estejam disponíveis no momento certo e em condições adequadas, reforçando a percepção de qualidade e confiabilidade por parte dos consumidores.

Além do impacto direto na experiência do cliente, a manutenção eficiente contribui para a otimização dos recursos organizacionais. Ao reduzir a incidência de paradas emergenciais e prolongar a vida útil dos equipamentos, é possível minimizar custos não planejados e otimizar o retorno sobre o investimento em ativos. Neste

estudo de caso, os ativos-alvo se distinguem por sua baixa complexidade e ciclo de vida operacional curto. Essa condição impõe a necessidade de uma avaliação contínua para sua renovação ou desativação, diferenciando-os de equipamentos de maior durabilidade. Adicionalmente, estratégias de contingência, como o emprego de equipamentos de backup, já são adotadas em operações críticas, visando minimizar interrupções na produção. Esta abordagem favorece não apenas o desempenho operacional, mas também o alinhamento estratégico da manutenção com os objetivos de longo prazo da organização.

Outro aspecto que reforça a justificativa deste estudo é a complexidade inerente à atuação das equipes de manutenção em estruturas distribuídas geograficamente. No caso da cooperativa, as unidades podem estar localizadas em diferentes cidades ou regiões, o que implica desafios adicionais relacionados ao deslocamento, à gestão de estoques de peças, à disponibilidade de mão de obra qualificada e à coordenação das intervenções. Esses fatores tornam essencial o desenvolvimento de métodos de avaliação que considerem não apenas indicadores técnicos, mas também variáveis logísticas e organizacionais que influenciam o desempenho.

Do ponto de vista metodológico, a aplicação de técnicas como a DEA se apresenta como uma alternativa viável e promissora. Esse método permite comparar o desempenho relativo de múltiplas unidades ou equipes, levando em consideração diversos insumos e produtos de forma simultânea, sem a necessidade de uma função de produção previamente definida. Em um cenário como o do ramo supermercadista na cooperativa, a DEA pode auxiliar na identificação de benchmarks internos, apontando quais equipes ou unidades apresentam melhores práticas e quais necessitam de aprimoramentos específicos.

A adoção de um modelo adaptado às especificidades do setor supermercadista e cooperativo representa uma oportunidade de avanço tanto teórico quanto prático. No campo acadêmico, o estudo contribui para propor um modelo que integra fatores técnicos e organizacionais, proporcionando um referencial para futuras pesquisas e aplicações em outros contextos de mensuração de eficiência. No campo aplicado, o modelo pode apoiar gestores na formulação de políticas de manutenção mais eficientes, no direcionamento de recursos para áreas críticas e na definição de indicadores que refletem de maneira precisa o desempenho das equipes.

Por fim, este trabalho se justifica pela possibilidade de gerar diferencial competitivo a rede de supermercados onde a concorrência é cada vez mais acirrada. Ao oferecer um método estruturado para mensurar e compreender a eficiência da manutenção em um ambiente caracterizado por alta exigência de disponibilidade e confiabilidade, a pesquisa fornece subsídios para decisões mais embasadas, capazes de melhorar o nível de serviço prestado ao cliente e de fortalecer a posição estratégica da organização no mercado.

1.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

A gestão da manutenção ocupa um lugar de destaque nas organizações modernas por seu impacto direto sobre a produtividade, a confiabilidade dos ativos e a sustentabilidade dos processos operacionais. A crescente complexidade dos sistemas produtivos, aliada à pressão por desempenho, qualidade e redução de custos, demanda abordagens cada vez mais estruturadas para a administração da função manutenção (Marques; Brito, 2019; Farias, 2024). Em resposta a esse cenário, diversas estratégias têm sido desenvolvidas, como a manutenção corretiva, preventiva, preditiva e prescritiva, cada uma com seus respectivos objetivos, metodologias e tecnologias de apoio (Tyagi *et al.*, 2024; Wang; Han, 2025).

Nos últimos anos, observou-se um avanço considerável na adoção de tecnologias digitais para dar suporte a gestão da manutenção. Ferramentas como inteligência artificial, internet das coisas, realidade aumentada, big data e gêmeos digitais têm sido aplicadas para prever falhas, otimizar intervenções e apoiar decisões em tempo real (Brik; En-nhaili; Meddaoui, 2025; Rücker *et al.*, 2025; Rehman *et al.*, 2025). Essas inovações têm impulsionado novas práticas, mas também expõem lacunas, sobretudo no que diz respeito à mensuração integrada da eficiência da manutenção como função organizacional.

A literatura especializada, conforme identificado na revisão sistemática conduzida no Artigo 1, revela que grande parte das pesquisas sobre eficiência em manutenção concentra-se na avaliação de ativos ou equipamentos isolados, priorizando métricas de desempenho técnico e confiabilidade de máquinas. Essa tendência, embora relevante, deixa em segundo plano a análise da manutenção como uma atividade sistêmica, que envolve fatores técnicos, humanos, gerenciais e contextuais interdependentes (Shao; Kumral, 2025; Liu *et al.*, 2024).

Apenas um estudo identificado na revisão aplica de forma direta a mensuração de eficiência no âmbito da manutenção organizacional: Sarfaraz *et al.* (2023) desenvolveram um modelo híbrido, combinando Análise Envoltória de Dados (DEA) e Sistemas de Inferência Fuzzy, para avaliar unidades de manutenção em empresas públicas de abastecimento de água. Apesar de metodologicamente consistente, essa aplicação está restrita ao setor de saneamento, o que limita a generalização dos resultados para outros contextos operacionais, como o varejo ou sistemas cooperativos.

O desafio é particularmente evidente em ambientes descentralizados, como os das cooperativas com rede varejista. Essas organizações operam unidades de supermercados e centros de distribuição que exigem alto nível de disponibilidade dos equipamentos para assegurar a continuidade do abastecimento e a satisfação dos clientes. A manutenção, nesse contexto, assume papel estratégico: evitar falhas em equipamentos de produção alimentos, sistemas de refrigeração, balanças, caixas e demais equipamentos é fundamental para manter a integridade dos produtos, preservar o nível de serviço e garantir que o consumidor encontre, no momento desejado, os itens que busca.

Além disso, a atuação em campo de equipes de manutenção em supermercados implica lidar com variáveis adicionais, como distância geográfica entre unidades, diversidade de ativos, condições ambientais variadas e restrições orçamentárias. Tais fatores exigem capacidade de improvisação, tomada de decisão ágil e adaptação às condições locais (Askari *et al.*, 2025). Entretanto, as metodologias de avaliação disponíveis ainda não contemplam de forma abrangente essa complexidade operacional, o que reforça a necessidade de estudos que proponham métodos aplicáveis e ajustados à realidade desses contextos.

Portanto, o problema central identificado reside na oportunidade de propor um método consolidado que permita mensurar a eficiência das atividades de manutenção considerando tanto aspectos técnicos quanto organizacionais, em setores nos quais a confiabilidade operacional e a experiência do cliente são determinantes para o desempenho global da organização. A sua relevância está diante do papel estratégico da manutenção em cadeias de suprimento críticas, como as que sustentam operações varejista em cooperativas.

Diante desse cenário, o presente estudo se propõe a responder à seguinte questão de pesquisa: Como medir a eficiência em serviços de manutenção?

1.4 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral é desenvolver um método para medição de eficiência em serviços de manutenção.

Para tanto, será necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar elementos práticos e teóricos para gestão e eficiência da manutenção através de uma revisão sistemática da literatura;
- b) Propor um método para medição de eficiência em serviços de manutenção;
- c) Testar o método em um caso prático e, com base nos resultados, refiná-lo.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em quatro capítulos. O primeiro capítulo aborda as questões introdutórias, de problematização, objetivos da pesquisa e justificativa. O segundo, em forma de artigo, consiste em uma RSL que aborda sobre elementos aplicados a gestão de manutenção. O terceiro, também em forma de artigo, apresenta o conteúdo principal, a proposição e aplicação de um método para medir a eficiência de serviços de manutenção. O último capítulo discute a aplicação, retoma lições aprendidas, projeta a continuidade de pesquisa e discute as implicações dos achados para praticantes e pesquisadores em manutenção.

2 ARTIGO 1 - EFICIÊNCIA E INTELIGÊNCIA NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA E ELEMENTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS PARA GESTÃO

RESUMO: A eficiência das operações de manutenção representa um dos principais desafios para organizações que buscam vantagem competitiva sustentável. Diante da crescente complexidade tecnológica e das demandas operacionais por disponibilidade e confiabilidade, este estudo teve como objetivo identificar elementos teóricos e práticos relevantes para a gestão e a eficiência da manutenção. A pesquisa adotou os protocolos PICOC e PRISMA para orientar uma revisão sistemática da literatura, resultando na seleção e análise de 17 artigos científicos publicados entre 2007 e 2025. A justificativa do estudo reside na carência de abordagens que articulem dimensões técnicas, humanas e organizacionais sob uma lógica integrada. Os resultados revelam uma ampla diversidade de métodos e aplicações, incluindo algoritmos de agendamento, modelos heurísticos, sistemas de apoio à decisão, estruturas baseadas em IIoT, bem como metodologias de avaliação da qualidade da informação. As contribuições práticas demonstram impacto direto na redução de custos, otimização de recursos e melhoria da confiabilidade operacional, enquanto as contribuições teóricas fornecem substrato conceitual para o avanço da área. Conclui-se que a literatura evolui em direção à construção de soluções inteligentes, adaptativas e baseadas em dados, alinhadas às diretrizes da Indústria 5.0. Os achados oferecem suporte à construção de modelos mais eficientes e integradores para a gestão da manutenção industrial.

PALAVRAS-CHAVES: Manutenção; Estratégia de Manutenção; Eficiência operacional; Modelos multicritério; Manutenção preditiva

2.1 INTRODUÇÃO

A busca por vantagem competitiva sustentável tem levado organizações a repensarem e otimizarem seus processos internos. Nesse cenário, a manutenção industrial emerge como uma atividade estratégica, fundamental para assegurar a confiabilidade operacional, reduzir custos e manter níveis elevados de produtividade (Marques; Brito, 2019). Em ambientes industriais cada vez mais dinâmicos, a

eficiência da manutenção passa a ser um fator crítico, especialmente em empresas que enfrentam pressões por agilidade, customização e disponibilidade contínua de seus ativos produtivos.

A evolução das tecnologias associadas à Indústria 4.0, como inteligência artificial (IA), internet das coisas (IoT), realidade aumentada (RA) e gêmeos digitais, tem transformado profundamente os processos de manutenção, permitindo diagnósticos mais precisos, intervenções preditivas e maior integração entre os sistemas de controle e operação (Brik; En-nhaili; Meddaoui, 2025; Rücker *et al.*, 2025; Tyagi *et al.*, 2024). Nesse novo paradigma, a manutenção deixa de ser uma função reativa ou apenas programada e passa a ser orientada por dados em tempo real e algoritmos que antecipam falhas e sugerem ações corretivas antes que ocorram interrupções (Brik; En-nhaili; Meddaoui, 2025).

Paralelamente à sofisticação tecnológica, cresce o entendimento de que a eficiência da manutenção depende também de fatores humanos, organizacionais e contextuais. Estudos têm apontado que as equipes de manutenção lidam com diferentes níveis de complexidade, variabilidade nas tarefas, diagnósticos situacionais e realidades operacionais que exigem respostas específicas e, por vezes, improvisadas (Askari *et al.*, 2025; Farias, 2024). Essas condições aproximam a manutenção de uma lógica de projeto, em que cada intervenção apresenta desafios próprios de gestão de tempo, recursos e conhecimento técnico.

Pesquisas contemporâneas têm explorado diversas abordagens para mensurar a eficiência na manutenção, com destaque para métodos multicritério, como AHP e VIKOR (Zhu; Xin; Jing, 2022), modelos de decisão com base em raciocínio por casos (Liu, Ru *et al.*, 2020), e aplicações mais robustas de análise envoltória de dados (DEA), que permitem comparar unidades de manutenção com base em múltiplas entradas e saídas (Sarfaraz *et al.*, 2023). No entanto, essas investigações ainda são escassas quando se trata de mensurar a eficiência das equipes de manutenção como unidades organizacionais, especialmente em contextos operacionais diversos, como cooperativas, redes varejistas e empresas de serviços.

A literatura aponta que, embora exista grande volume de pesquisas relacionadas à eficiência em manutenção, a maioria está concentrada na análise de técnicas específicas (como manutenção preditiva ou preventiva), ou em abordagens voltadas à confiabilidade de máquinas e equipamentos (Shao; Kumral, 2025; Wang; Han, 2025). Poucas abordagens têm se dedicado a compreender como os fatores

práticos (como recursos, tipos de tarefa, tempo de resposta) e os elementos teóricos (como modelos de decisão, métricas de desempenho, fundamentos da eficiência) se integram para produzir resultados sustentáveis em campo. Essa lacuna torna-se ainda mais evidente em ambientes nos quais as equipes de manutenção operam externamente, enfrentando variabilidade significativa nas condições de execução.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo identificar elementos práticos e teóricos para gestão e eficiência da manutenção.

A justificativa desta pesquisa está ancorada na escassez de estudos que abordem a eficiência da manutenção sob uma perspectiva integrada — que considere simultaneamente aspectos técnicos, humanos e gerenciais — e que proponham modelos aplicáveis à realidade das equipes de manutenção atuantes em campo. Além disso, avanços recentes na literatura, como os estudos de (Tian *et al.*, 2025) sobre planejamento colaborativo, de (Lu *et al.*, 2025) sobre programação distribuída com múltiplas equipes e de (Rücker *et al.*, 2025) sobre uso de RA, ainda não se traduziram em modelos consolidados que articulem esses desenvolvimentos tecnológicos com práticas de avaliação do desempenho de equipes. Portanto, este estudo pretende contribuir com subsídios teóricos e operacionais que auxiliem gestores e pesquisadores na construção de sistemas de manutenção mais eficientes, mensuráveis e alinhados às novas tecnologias digitais.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Protocolo PIPOC

A definição criteriosa de métodos é imprescindível para nortear o desenvolvimento de uma pesquisa científica, assegurando sua rigorosidade metodológica, bem como promovendo a qualidade e a reproduzibilidade dos resultados obtidos (Sott *et al.*, 2021). Nesse contexto, a adoção de procedimentos sistemáticos se configura como uma estratégia essencial para garantir que todas as etapas do estudo sejam conduzidas de maneira clara, objetiva e alinhada aos objetivos propostos.

No presente trabalho, foi empregado o protocolo PICOC (*Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context*) como instrumento metodológico central, visando orientar e estruturar o processo de formulação das questões de pesquisa,

além de subsidiar a definição da *string* de busca utilizada nas bases de dados selecionadas. O protocolo também serviu de referência para a delimitação rigorosa dos critérios de inclusão e exclusão dos documentos analisados, assegurando, assim, a consistência e a transparência no processo de seleção das evidências científicas.

Os atributos considerados no protocolo PICOC, que nortearam todas as decisões metodológicas deste estudo, estão apresentados de forma detalhada no Quadro 1, permitindo a replicabilidade do procedimento e reforçando o compromisso com as boas práticas de pesquisa científica.

Quadro 1– Atributos de acordo com o protocolo PICOC

Atributos	Descrição
População	Pesquisa com as strings: efficiency, maintenance service, maintenance team, maintenance employee, assessment, evaluation.
Intervenção	Durante a leitura dos títulos e resumos identificou-se algum tipo de relação com os objetivos da pesquisa, ou seja, gestão da manutenção
Comparação	Os documentos não excluídos na seção anterior foram lidos integralmente.
Resultado	Análise dos textos e identificação de pontos relacionados a gestão da manutenção.
Contexto	Identificação de elementos da gestão da manutenção, com os principais resultados e contribuições práticas e teóricas das pesquisas avaliadas

Fonte: Adaptado de Pollock, Berge (2018)

Após a definição dos atributos de análise definiu-se o objetivo da pesquisa que foi: identificar elementos práticos e teóricos para gestão e eficiência da manutenção. Para atender esta questão, foram utilizados estudos disponíveis no banco de dados Web of Science, Scopus. Na fase de população do protocolo PICOC, a seguintes strings de busca foram aplicadas: efficiency, maintenance service, maintenance team, maintenance employee, assessment, evaluation; As strings foram combinadas na seguinte forma: (((efficiency) AND (("maintenance service*")) OR ("maintenance team*")) OR (("maintenance employee*")) AND ("assessment" OR "evaluation"))).

Na fase de Intervenção, foram estipulados critérios de inclusão e exclusão de documentos para selecionar apenas os trabalhos relacionados ao objetivo deste estudo. Nesse sentido foram aceitos artigos de pesquisa e revisão publicados em periódicos ou conferências, sem restrição temporal. As três últimas fases do protocolo PICOC (Comparação, Resultado e Contexto) foram realizadas juntamente com a fase de Elegibilidade do protocolo PRISMA. Os documentos foram lidos na íntegra para identificar as informações sobre gestão da manutenção e seus principais resultados e contribuições das pesquisas analisadas.

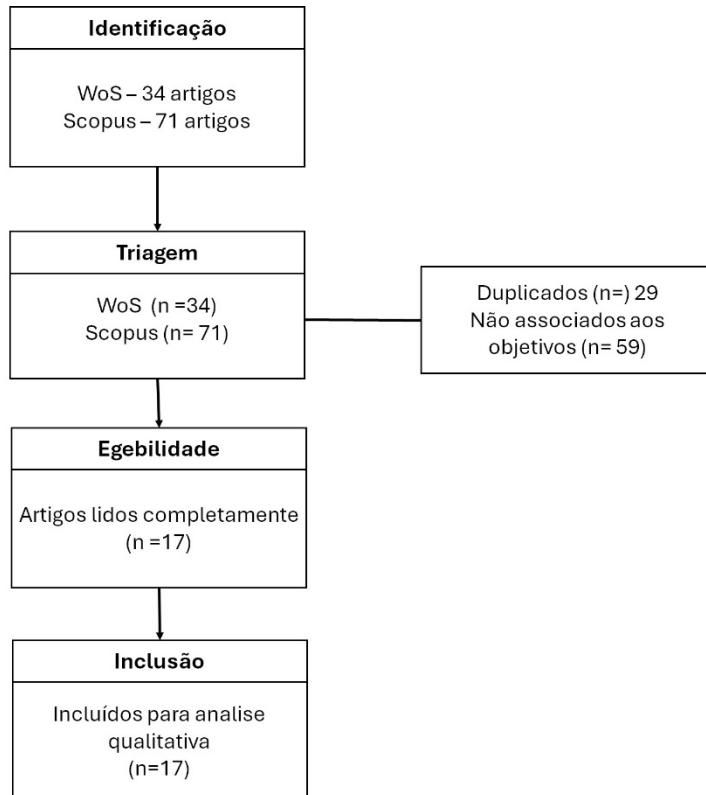
2.2.1 Protocolo Prisma

Na segunda etapa deste estudo, optou-se pela utilização do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), reconhecido na literatura científica como um método robusto e amplamente consolidado, que confere rigor e transparência aos processos de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão de documentos pertinentes aos objetivos da pesquisa (Pollock; Berge, 2018). O emprego do PRISMA visa assegurar a sistematização e a replicabilidade das etapas do levantamento bibliográfico, minimizando potenciais vieses na seleção das evidências e fortalecendo a validade interna do estudo.

O protocolo PRISMA se configura como um checklist estruturado de itens essenciais, que orienta os pesquisadores a manterem o foco nos objetivos centrais da investigação, além de garantir a integridade e a confiabilidade dos dados coletados, bem como a clareza e a precisão das informações reportadas (Hsu *et al.*, 2024). Dessa forma, a aplicação deste protocolo contribui significativamente para a qualidade metodológica das revisões sistemáticas, sendo considerado uma referência fundamental nas pesquisas que demandam rigor na coleta e análise de evidências.

A Figura 1 apresenta de maneira esquemática as etapas do protocolo PRISMA que foram seguidas neste estudo, evidenciando o percurso metodológico adotado para identificar, analisar e interpretar de forma crítica todas as evidências relacionadas às questões de pesquisa previamente definidas.

Figura 1 – Fases do protocolo Prisma



Fonte: Adaptado de (Sott *et al.*, 2021)

2.3 RESULTADOS

Após a avaliação qualitativa de 17 artigos apresentam-se os resultados. A primeira avaliação apresentada na Tabela é a quantidade de artigos analisados por ano de publicação.

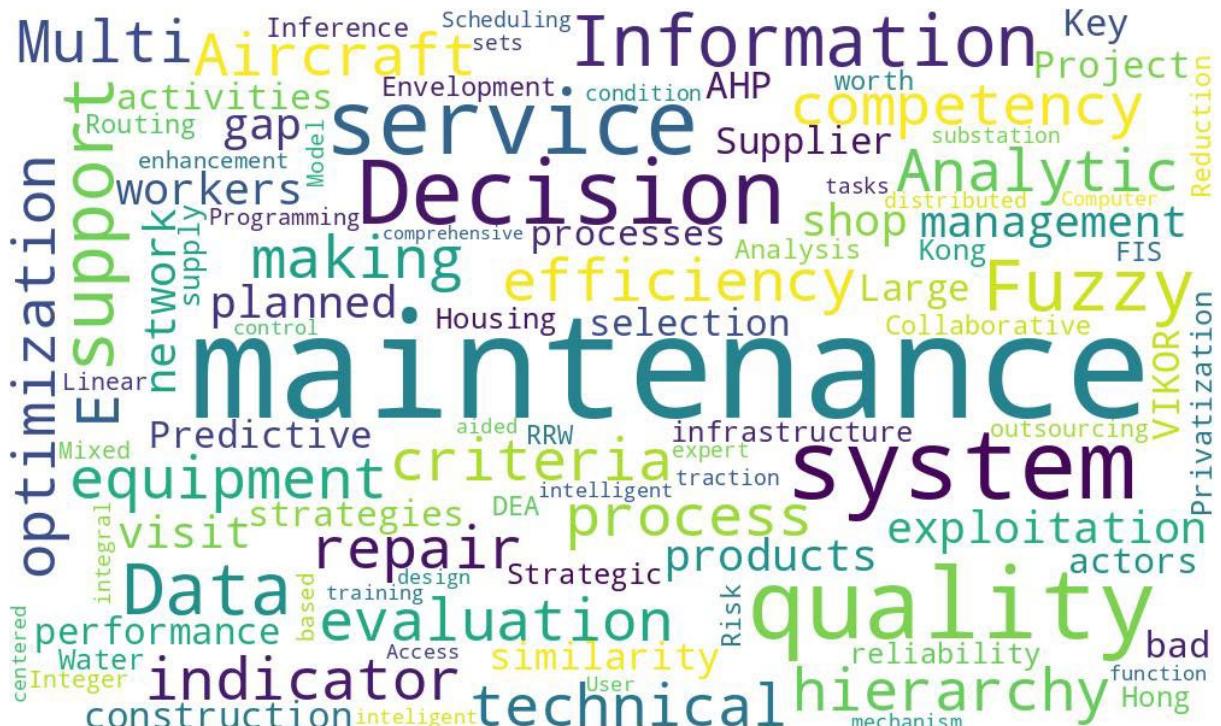
Tabela 1 – Quantidade de artigos publicados por ano

Ano	Quantidade	Ano	Quantidade
2007	1	2020	1
2011	1	2021	1
2014	1	2022	2
2015	2	2023	1
2016	2	2024	1
2018	3	2025	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando-se os resultados apresentados na Tabela 1, percebe-se que os anos de 2018 tiveram mais publicações avaliadas (3 artigos) seguido por publicações dos anos de 2015, 2016 e 2022 (com duas em cada ano). A próxima análise realizada foi estruturar uma nuvem das palavras-chaves dos artigos avaliados que está disponível na Figura 2.

Figura 2 – Nuvem de palavras formada com as palavras chaves dos artigos avaliados.



Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando-se a nuvem de palavras percebe-se destaque para alguns termos, como por exemplo, *maintenance*, *quality*, *service*, *information*, *decision*, entre outros.

2.3.1 Objetivos dos estudos e métodos utilizados

A próxima análise realizada foi a elaboração de uma tabela com os autores dos artigos, objetivo e método utilizado na pesquisa, no qual, os resultados estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Autores dos artigos, objetivo e método utilizado na pesquisa

Autores	Objetivo do estudo	Método de pesquisa
Antosz (2018)	O objetivo principal desenvolver um modelo abrangente para a avaliação das competências dos trabalhadores da área de manutenção, permitindo, assim, a identificação do nível atual de competências, a detecção de eventuais lacunas e a avaliação dos efeitos decorrentes da não conformidade com os níveis de competência exigidos.	O método de pesquisa adotado foi estruturado em duas etapas complementares. Na primeira etapa, foi realizada uma investigação empírica junto a empresas manufatureiras. Na segunda etapa, elaborou-se e validou-se uma metodologia de avaliação de competências, composta por três níveis integrados
Liu et al. (2018)	O objetivo foi apresentar uma visão geral do sistema inteligente de agendamento de serviços de manutenção para máquinas agrícolas, bem como estabelecer as bases teóricas de cada módulo que compõe esse sistema.	O estudo adota uma abordagem aplicada e exploratória, com base no desenvolvimento de um sistema inteligente para agendamento de serviços de manutenção, fundamentado em uma estrutura modular teórica e tecnológica.
Balogh et al. (2018)	Propor uma arquitetura de referência para o desenvolvimento de uma plataforma colaborativa preditiva voltada para a manutenção inteligente no setor de manufatura.	O método de pesquisa utilizado consistiu no desenvolvimento conceitual e funcional de uma arquitetura composta por quatro pilares fundamentais. O primeiro pilar é o framework de coleta de dados, que integra objetos físicos inteligentes e sistemas empresariais mediante o uso de tecnologias IIoT.
Liu et al. (2020)	Propor um modelo de decisão heurística para a definição de prioridades na manutenção planejada de produtos submetidos a reparos em oficinas especializadas.	O método de pesquisa envolveu a introdução do conceito de “mapa de manutenção”, que orienta a representação dos produtos com base em dois eixos: o plano de manutenção e o suporte técnico.
(Aiello et al., 2021)	Desenvolver um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) para a gestão de manutenção de um sistema de serviços, especificamente voltado para um veículo de limpeza urbana equipado com um sistema inteligente de diagnóstico remoto.	O método de pesquisa adotado consistiu na concepção e implementação de um SAD baseado em uma abordagem combinada, que integra: (i) a metodologia DEMATEL — Laboratório de Avaliação e Experimentação de Decisão Multicritério (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory), e (ii) um modelo matemático de manutenção preditiva.
Zhu, Xin, Jing (2022)	Analizar os fatores determinantes na seleção de fornecedores de manutenção de equipamentos de grande porte para empresas de construção civil.	O método de pesquisa foi conduzido por meio de um estudo de caso em uma das 10 maiores empresas chinesas de construção. Inicialmente, identificou-se fatores que influenciam na seleção de fornecedores e aplicou-se questionários. Após elaborou-se uma estrutura hierárquica de avaliação, composta por cinco índices de primeira ordem; e posteriormente, aplicou-se a AHP (Analytic Hierarchy Process) para determinar os pesos relativos de cada critério. Por fim, aplicou-se o VIKOR (VišeKriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje) para realizar a avaliação e o ranqueamento dos fornecedores candidatos.
Dziabas, Deja, Wiśniewska (2022)	Propor uma estratégia de gestão da operação da infraestrutura técnica baseada na análise de “Bad Actors” (atores problemáticos), utilizando como estudo de caso a empresa petrolífera polonesa LOTOS Group S.A.	O método de pesquisa adotado fundamentou-se em um estudo de caso que integrou diferentes estratégias de manutenção e um modelo híbrido de gestão, que combina: (i) manutenção preventiva, especialmente para motores elétricos e válvulas de segurança, com inspeções periódicas programadas; (ii) manutenção reativa, aplicada a equipamentos de menor criticidade, com ações corretivas após a ocorrência de falhas; (iii) gestão baseada na condição (Condition-Based Maintenance — CBM); (iv) manutenção total produtiva (Total Productive Maintenance — TPM), com participação ativa dos operadores nas atividades de inspeção e cuidados básicos com os equipamentos.
(Madhikeri et al., 2016)	O estudo teve como objetivo principal desenvolver uma ferramenta para avaliação da qualidade dos procedimentos de reporte de manutenção, denominada Painel de Avaliação da Qualidade de Reportes de Manutenção — MRQA (Maintenance Reporting Quality Assessment).	O método de pesquisa adotado foi baseado na integração de técnicas de Tomada de Decisão Multicritério — MCDM (Multi-Criteria Decision Making), com destaque para o uso da Análise Hierárquica de Processos — AHP (Analytic Hierarchy Process).
Lam, (2008)	Desenvolver um modelo de avaliação estratégica para gestores públicos de Hong Kong, com o intuito de apoiar a seleção de consultores de manutenção predial que	O método de pesquisa consistiu na construção do modelo estratégico de avaliação, que utiliza a razão VFM (Value for Money), definida como a relação entre a qualidade do serviço prestado e os custos de entrada, avaliados

Autores	Objetivo do estudo	Método de pesquisa
	ofereçam o melhor valor (Value for Money — VFM) no contexto da privatização dos serviços públicos.	independentemente. A pesquisa foi orientada pela hipótese de que existe uma correlação entre a qualidade do serviço e fatores de gestão e econômicos das empresas de consultoria.
Sarfaraz et al. (2023)	Desenvolver e aplicar uma abordagem híbrida inovadora para avaliar a eficiência dos processos de reparo e manutenção em companhias de fornecimento de água, utilizando uma combinação do Modelo de Medida Baseada em Folgas — USBM (Unit Slacks-Based Measure) e do Sistema de Inferência Fuzzy — FIS (Fuzzy Inference System).	O método de pesquisa envolveu a aplicação da Análise Envolvória de Dados — DEA (Data Envelopment Analysis) em modelos não radiais para mensurar a eficiência das unidades de manutenção, com base em múltiplos inputs e outputs. Os escores de eficiência obtidos por meio da DEA foram integrados a um Sistema de Inferência Fuzzy — FIS, possibilitando uma análise mais abrangente e a formulação de estratégias para a melhoria do desempenho das unidades avaliadas.
Qin, Ng, Sun (2024)	Propor uma estratégia de acessibilidade a serviços para o roteamento de manutenção de aeronaves, considerando colaborações interorganizacionais no contexto de terceirização de manutenção (Maintenance, Repair, and Overhaul — MRO).	O método de pesquisa desenvolvido consistiu na formulação de um modelo matemático baseado em Programação Linear Inteira Mista — MILP (Mixed-Integer Linear Programming), com índice temporal discreto, para resolver o AMRP com foco em estratégias colaborativas. A eficácia e eficiência do modelo foram validadas por meio de experimentos computacionais com dados operacionais de uma companhia aérea regional asiática.
Lu et al. (2025)	O objetivo foi propor um modelo de agendamento de tarefas de manutenção distribuída para múltiplas equipes técnicas, considerando a incerteza nas durações das tarefas e os efeitos de deterioração dependentes do tempo, alinhado aos princípios da Indústria 5.0.	O método de pesquisa envolveu a formulação de um modelo matemático para o problema de Agendamento de Tarefas de Manutenção Distribuídas — DMTS (Distributed Maintenance Task Scheduling), que incorpora: (i) o efeito da deterioração dependente do tempo sobre a duração real das tarefas; (ii) a incerteza probabilística nas durações das tarefas, modelada por uma distribuição normal; e (iii) a necessidade de coordenação entre múltiplas equipes técnicas, que se deslocam entre os locais de manutenção.
Matusevych, (2016)	O objetivo principal desenvolver uma metodologia para a determinação do índice de qualidade do sistema de manutenção e reparo — SMR (Maintenance and Repair) dos equipamentos elétricos de potência de subestações de tração — TS (Traction Substations) de ferrovias eletrificadas	O método de pesquisa adotado baseou-se na aplicação dos princípios da Teoria dos Conjuntos Fuzzy (Fuzzy Sets Theory) e no uso de avaliações balizadas, linguísticas e intervalares fornecidas por especialistas.
Meng; Yanli; Xuemei (2011)	Pesquisar os mecanismos de coordenação remota, controle de risco e segurança associados ao sem e a construção de um modelo de avaliação inteligente e a integração eficiente entre ferramentas de manufatura eletrônica e de e-business.	O artigo utiliza uma abordagem qualitativa de natureza teórico-conceitual, com foco no desenvolvimento de um modelo funcional de serviço de manutenção inteligente. A metodologia é caracterizada pela proposição de mecanismos e funções baseadas em tecnologias como Web Services.
Chu; Yu; Wang (2014)	Apresentar uma proposta de sistema computacional voltado para o treinamento e avaliação em manutenção aeronáutica, fundamentado na abordagem de design centrado no usuário (user-centered design — UCD).	Visando melhorar a eficiência do treinamento em manutenção de aeronaves, o documento propõe um sistema baseado em design centrado no usuário.
(Robson et al., 2015)	Implementação prática de um procedimento de avaliação para determinação de frequências de	A metodologia adotada consistiu na criação de um processo estruturado de avaliação de risco com base em dois cenários

Autores	Objetivo do estudo	Método de pesquisa
	inspeção ideais (intervalo de endosso) para dispositivos de alívio de pressão	críticos de falha: (i) a falha em operar sob demanda, isto é, o dispositivo não abrir corretamente em situações de sobre pressão, e (ii) a falha em permanecer fechado quando necessário, como no caso de vazamentos contínuos que comprometem a integridade do sistema e geram perdas econômicas e ambientais.
(Lesjak <i>et al.</i> , 2015)	O objetivo da pesquisa é propor e validar um sistema seguro de autenticação de clientes para serviços de manutenção inteligente, especificamente através do protocolo MQTT (Message Queue Telemetry Transport), utilizado para comunicação em sistemas distribuídos	A pesquisa é estruturada metodologicamente a partir de uma análise de ameaças ao protocolo MQTT, identificando riscos como a interceptação de mensagens, a publicação de dados falsos por dispositivos não autorizados e o acesso indevido aos tópicos do broker MQTT.

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise do Quadro 2 do estudo revela a diversidade de enfoques metodológicos e objetivos propostos nas pesquisas sobre manutenção, com ênfase em soluções inteligentes, modelos decisórios e integração de tecnologias emergentes. Destaca-se a contribuição de Antosz (2018), ao desenvolver um modelo de avaliação de competências em manutenção industrial, o que contribui diretamente para o mapeamento de lacunas e a elevação da qualificação dos profissionais da área. Liu *et al.* (2018) e Balogh *et al.* (2018) propuseram sistemas inteligentes e arquiteturas colaborativas com base em tecnologias IIoT e módulos teóricos aplicados à gestão de serviços de manutenção. Esse movimento de integração tecnológica é também evidenciado por Aiello *et al.* (2021), ao desenvolver um sistema de apoio à decisão baseado em modelos multicritério, como o DEMATEL e a manutenção preditiva, otimizando intervenções em veículos de limpeza urbana.

Outros estudos focalizaram a tomada de decisão em ambientes industriais complexos. Zhu, Xin e Jing (2022), por exemplo, empregaram AHP e VIKOR para selecionar fornecedores de manutenção, combinando critérios qualitativos e quantitativos. Da mesma forma, Sarfaraz *et al.* (2023) propuseram uma abordagem híbrida unindo DEA e sistemas fuzzy para avaliar a eficiência de serviços de manutenção hídrica. Já Qin, Ng e Sun (2024) modelaram o roteamento de manutenção de aeronaves com base em programação linear inteira mista, contemplando colaborações interorganizacionais no outsourcing de manutenção. Esses achados indicam uma tendência consistente de evolução das práticas de manutenção para além do escopo operacional, incorporando estratégias baseadas em dados, inteligência artificial e métodos quantitativos robustos, em consonância

com os avanços propostos pela Indústria 4.0 e, mais recentemente, pela Indústria 5.0 (Lu *et al.*, 2025).

2.3.1 Principais resultados dos estudos avaliados

No primeiro estudo avaliado constatou-se que 55% das empresas analisadas realizam a identificação das competências necessárias para as atividades de manutenção, embora a maioria não implemente de forma sistemática processos de avaliação formal de seus colaboradores. Observou-se que 84% das empresas conduzem avaliações periódicas, sendo esta prática mais prevalente em empresas de médio e grande porte. As ferramentas mais utilizadas para tal avaliação são a matriz de competências, frequentemente complementada por fichas de avaliação. Os dados indicam ainda que existe uma lacuna significativa de competências, especialmente nas empresas de pequeno porte, fato que compromete a eficiência dos processos de manutenção e, consequentemente, a disponibilidade dos equipamentos. A aplicação do modelo proposto na empresa analisada demonstrou que apenas 33% dos trabalhadores atendem aos requisitos mínimos de competência, evidenciando a necessidade de implementação de programas de capacitação específicos (Antosz, 2018). Já no próximo estudo, os resultados apresentados consistem na proposição de um modelo que proporciona uma decisão de agendamento de manutenção mais precisa, eficiente e em tempo real. Entre as inovações apresentadas, destaca-se a construção de uma rede dinâmica de serviços, adaptável às variações espaço-temporais das demandas de manutenção. Outro avanço importante refere-se à gestão de agendamento de serviços, onde foi desenvolvido um método baseado em um algoritmo genético aprimorado, que considera informações de previsão de falhas, custos de manutenção, localização dinâmica e correspondência de competências dos técnicos. Essa abordagem resultou na obtenção de esquemas otimizados para o agendamento das manutenções, promovendo um aumento significativo na eficiência operacional dos recursos disponíveis. No âmbito da gestão do conhecimento, o sistema propõe métodos robustos para mineração e reutilização de dados históricos de manutenção, com vistas à melhoria da capacidade decisória dos prestadores de serviço e à elevação da eficiência dos processos de manutenção (Liu, *et al.*, 2018).

No próximo estudo apresentou como resultados alcançados pelo estudo indicam que a arquitetura proposta é replicável e aplicável a uma ampla gama de

indústrias, oferecendo uma solução escalável para melhorar a eficiência produtiva através de monitoramento em tempo real, detecção precoce de falhas e aceleração na execução dos serviços de manutenção. A análise de casos industriais reais demonstrou a viabilidade da aplicação da arquitetura, destacando sua capacidade de promover a integração entre recursos físicos e lógicos, organizados em camadas hierárquicas e interconectados por meio de interfaces de programação de aplicações (APIs) (Balogh *et al.*, 2018). No próximo estudo os resultados indicaram que o “mapa de manutenção” e o sistema de indicadores de avaliação são elementos fundamentais para a decisão heurística baseada em raciocínio por similaridade. A aplicação conjunta do raciocínio baseado em similaridade com o algoritmo de colônia de formigas resultou em uma decisão heurística otimizada, apresentando eficácia, viabilidade e operacionalidade na definição das prioridades de manutenção. Além disso, os resultados mostraram que a metodologia proposta permite reduzir significativamente o tempo e os custos de manutenção, além de melhorar a eficiência e a qualidade das operações (Liu, *et al.*, 2020).

No quinto artigo avaliado evidenciou-se que a integração da tecnologia blockchain ao SAD proporciona um sistema mais seguro e transparente, permitindo decisões em tempo real sobre intervenções de manutenção, com base no número de alertas gerados pelos sensores e considerando as restrições orçamentárias anuais. A metodologia aplicada possibilitou a seleção de ICDs críticos, como o Tempo Total de Inatividade (TTI — Total Downtime, TD), o Número de Alarmes (NA — Number of Alarms) e o Custo Anual Total de Manutenção em relação ao Orçamento (AMC — Annual Maintenance Cost versus budget), que foram utilizados para guiar as decisões e avaliar a eficácia das políticas de manutenção implementadas (Aiello *et al.*, 2021). No próximo estudo avaliado demonstrou que a combinação dos métodos AHP-VIKOR permite uma avaliação abrangente e cientificamente embasada na seleção de fornecedores de manutenção de equipamentos de grande porte. A aplicação dessa abordagem favoreceu a escolha de um fornecedor que maximiza os benefícios organizacionais, ao mesmo tempo em que minimiza os riscos associados a decisões inadequadas, além de garantir que os fatores críticos de sucesso sejam devidamente considerados (Zhu; Xin; Jing, 2022).

Os principais resultados revelaram que a aplicação da metodologia que integrou diferentes estratégias de manutenção e um modelo híbrido de gestão resultou na redução significativa da frequência de falhas e na extensão dos intervalos entre

reparos para os grupos de equipamentos analisados, como bombas, compressores, misturadores e ventiladores. Além disso, a abordagem possibilitou uma priorização eficaz das intervenções de manutenção, orientando os recursos para os equipamentos com maior impacto na continuidade operacional e na redução dos custos de manutenção (Dziabas; Deja; Wiśniewska, 2022).

No próximo estudo avaliado confirmou-se a hipótese de que a avaliação objetiva do VFM é o melhor critério para selecionar consultores de manutenção. A análise identificou quatro fatores principais que influenciam significativamente a qualidade do serviço: nível de competição (Competition Level — CL), desempenho anterior (Past Performance — PP), sistema de avaliação do líder do projeto (Project Leader Assessment System — PLAS) e sistema de benchmarking da qualidade (Benchmarking System — BS). O fator desempenho anterior destacou-se como o mais significativo, com forte correlação positiva com a qualidade do serviço, validando a premissa de que o desempenho passado é o melhor preditor do desempenho futuro (Lam, 2008). Na próxima pesquisa avaliada trata de um estudo de uma companhia de abastecimento de água de Teerã, os resultados apresentaram como elemento de inovação, o estudo propôs a criação de um novo índice denominado MRRW (Modified Risk Reduction Worth), que combina a eficiência obtida pela DEA com o tradicional índice de Redução do Risco — RRW (Risk Reduction Worth). A utilização deste índice modificado permitiu uma avaliação mais precisa da eficiência das unidades de manutenção, superando as limitações do uso isolado do RRW, tradicionalmente empregado pelo Centro de Monitoramento de Desempenho — PMC (Performance Monitoring Center). Os principais resultados indicaram que o índice MRRW apresentou melhor capacidade de avaliação da eficiência das unidades de manutenção do que as métricas tradicionais, permitindo uma classificação mais acurada entre unidades eficientes e ineficientes. A aplicação do FIS permitiu gerar planos de melhoria específicos para cada unidade, categorizando-as entre ações como “reengenharia do processo”, “apresentação de plano de ação”, “planejamento de metas” ou “manutenção da situação atual” (Sarfaraz et al., 2023).

Na próxima pesquisa realizada indicaram que a estratégia colaborativa proposta melhora significativamente a acessibilidade aos serviços de manutenção, permitindo que as companhias aéreas ajustem seus cronogramas de manutenção com base na capacidade real de serviço fornecida pelos prestadores. A aplicação da abordagem colaborativa possibilitou a identificação e mitigação de gargalos na oferta

de serviços de manutenção, sobretudo em cenários com alta demanda simultânea por diferentes companhias aéreas. Além disso, a abordagem de redução de complexidade contribuiu para a obtenção de soluções de alta qualidade em tempos computacionais reduzidos (Qin; Ng; Sun, 2024). Os resultados do próximo estudo indicaram que o algoritmo IVNS superou significativamente outras abordagens, como Busca Tabu (Tabu Search — TS) e Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms — GA), demonstrando um ganho médio de 39,7% em relação ao limite inferior em 36 instâncias experimentais. O modelo permitiu maximizar a probabilidade de conclusão das tarefas de manutenção dentro dos prazos estipulados, promovendo maior robustez sistêmica e redução de atrasos. Além disso, a abordagem proposta priorizou a flexibilidade no agendamento, evitando sobrecarga das equipes e assegurando um ambiente de trabalho mais sustentável e centrado no bem-estar dos técnicos (Lu *et al.*, 2025).

Na décima-terceira pesquisa avaliada, os resultados demonstraram que a melhoria da qualidade do sistema de manutenção pode ser alcançada através da resolução de problemas específicos relacionados ao aumento da confiabilidade operacional dos equipamentos de potência das TS, em três áreas inter-relacionadas: técnica, econômica e organizacional. Foram descritas as diversas formas de representação dos dados de especialistas e as respectivas metodologias de cálculo do índice integral de qualidade do sistema de manutenção e reparo (Matusevych, 2016). Na próxima pesquisa teve como principais resultados indicam que a ferramenta desenvolvida do MRQA dashboard, permite que gestores de diferentes níveis (operacional, tático e estratégico) avaliem em tempo real a qualidade dos dados produzidos em suas respectivas unidades. A análise empírica, realizada com base em mais de 275 mil relatórios de manutenção provenientes de 54 unidades, demonstrou a capacidade do sistema em gerar rankings por unidade e por dimensão de qualidade, identificando pontos críticos e subsidiando planos de ação personalizados (Madhikermi *et al.*, 2016).

Os resultados do próximo estudo avaliado demonstraram que o serviço de manutenção inteligente possui as características de agilidade, inteligência, rede e socialização. Pode reduzir o custo da empresa de fabricação, melhorar a eficiência e aumentar a competitividade do núcleo. Este artigo pesquisa o mecanismo de coordenação remota, o mecanismo de controle de risco e o mecanismo de segurança, em seguida, explora a formação e otimização da estratégia de eMS com base no

raciocínio baseado em casos, modelo de avaliação inteligente e esquemas de integração eficazes para realizar uma Web corporativa e manufatura e uma ferramenta de negócios eletrônicos (Meng; Yanli; Xuemei, 2011). No próximo artigo avaliado desenvolveu-se o design de software centrado no usuário é um processo em várias etapas que prioriza a experiência do usuário. O sistema envolve três tipos de usuários: alunos, professores e administradores, cada um com funções específicas (Chu; Yu; Wang, 2014).

No próximo estudo apresentou como principais resultados que aproximadamente 70% dos PRDs avaliados puderam ter seus intervalos de inspeção estendidos em até seis anos (com implementações iniciais limitadas a aumentos de dois anos por prudência). Cerca de 16% permaneceram com os intervalos atuais e apenas 8% exigiram reduções. O processo também evidenciou a necessidade de padronização na documentação de testes e procedimentos de recertificação, o que levou à reformulação de formulários e diretrizes internas. Com isso, aumentou-se a rastreabilidade e a confiabilidade dos dados utilizados para as decisões de manutenção (Robson *et al.*, 2015). Por fim, no último estudo avaliado os autores propõem uma arquitetura em que a comunicação entre o dispositivo (APC) e o Message Broker (MIB) é protegida via autenticação mútua em TLS, utilizando um controlador de segurança em hardware dedicado, que armazena com segurança as chaves privadas dos dispositivos e realiza a assinatura digital durante o processo de handshake TLS (Lesjak *et al.*, 2015).

2.3.1 Principais contribuições teóricas e práticas dos estudos avaliados.

As principais contribuições teóricas e práticas dos estudos avaliados estão apresentadas na Quadro 3

Quadro 3 – Principais contribuições dos estudos avaliados

Autores	Contribuições Teóricas	Contribuições Práticas
Antosz, (2018)	Propõe um modelo para avaliar competências em manutenção, contribuindo para a identificação de lacunas e alinhamento entre habilidades técnicas e demandas industriais.	Permite direcionar ações formativas específicas para aumentar a eficácia e reduzir falhas operacionais.
Liu, Y. et al. (2018)	Desenvolve uma estrutura teórica modular para sistemas de agendamento inteligente em manutenção agrícola, integrando lógica adaptativa ao planejamento.	A solução proposta possibilita maior eficiência e resposta dinâmica na gestão de serviços agrícolas em campo.
(Balogh <i>et al.</i> , (2018)	Apresenta arquitetura baseada em IIoT e predição colaborativa, promovendo integração entre dispositivos inteligentes e sistemas corporativos.	A arquitetura facilita a implementação de manutenção inteligente e adaptável ao ambiente fabril digitalizado.

Autores	Contribuições Teóricas	Contribuições Práticas
Liu et al. (2020)	Introduz o “mapa de manutenção” como ferramenta heurística para priorizar serviços conforme suporte técnico e plano de manutenção.	Apoia o gerenciamento prático de oficinas especializadas, otimizando recursos e ordens de serviço.
Aiello et al. (2021)	Integra DEMATEL com manutenção preditiva em um sistema de apoio à decisão voltado à eficiência de serviços urbanos.	Melhora o desempenho de veículos com diagnósticos remotos e intervenções orientadas por critérios multicritério.
Zhu, Xin, Jing (2022)	Aplica AHP e VIKOR em uma estrutura hierárquica para ranqueamento de fornecedores, considerando múltiplos fatores de decisão.	Fornece uma abordagem precisa para escolha de fornecedores de manutenção em empresas de grande porte.
Dziabas, Deja, Wiśniewska (2022)	Propõe uma abordagem híbrida com foco em “Bad Actors”, combinando técnicas preventivas, reativas e baseadas em condição.	Otimiza a gestão de ativos críticos, utilizando sensores e análises para planejar intervenções eficientes.
Madhikermi et al. (2016)	Desenvolve o painel MRQA com base na teoria da qualidade de dados, integrando critérios como veracidade e tempestividade.	Qualifica os registros de manutenção, gerando confiança nos dados e apoio à tomada de decisão industrial.
Lam, (2008)	Introduz a métrica Value for Money como parâmetro estratégico para avaliação de consultores de manutenção predial.	Supõe decisões públicas em processos de privatização, equilibrando custos e qualidade dos serviços contratados.
Sarfaraz et al. (2023)	Combina DEA e FIS para avaliar eficiência de unidades operacionais com múltiplos insumos e resultados.	Oferece base para reestruturação de processos em companhias de água, com foco na eficiência de manutenção.
Qin, Ng, Sun (2024)	Apresenta modelo MILP para roteamento de manutenção de aeronaves, considerando colaborações interorganizacionais.	Otimiza a logística de manutenção terceirizada em companhias aéreas, reduzindo tempos ociosos e sobrecustos operacionais.
Lu et al. (2025)	Projeta modelo de agendamento distribuído com múltiplas equipes e tarefas com incerteza e deterioração temporal.	Permite gerenciamento mais eficiente e realista da manutenção, alinhado aos princípios da Indústria 5.0.
Matusevych (2016)	Cria metodologia para avaliação do sistema de manutenção de subestações ferroviárias, com base em lógica fuzzy.	Permite decisões mais precisas sobre confiabilidade e desempenho dos equipamentos de tração elétrica.
Meng; Yanli; Xuemei (2011)	Proposição de um modelo conceitual de e-manutenção inteligente com base em mecanismos colaborativos, de segurança e avaliação inteligente.	Integração de ferramentas de e-manufatura e e-business para reduzir custos e aumentar a eficiência na manutenção industrial.
Chu; Yu; Wang (2014)	Apresenta sistema de treinamento baseado em design centrado no usuário para manutenção aeronáutica.	Melhora a aprendizagem técnica por meio de simulações interativas, alinhando competências às exigências do setor.
Robson et al. (2015)	Introduz metodologia para cálculo ideal de intervalos de inspeção em válvulas de segurança sob cenários críticos.	Aumenta a confiabilidade de equipamentos de pressão, prevenindo falhas operacionais.
Lesjak et al., (2015)	Realiza análise de ameaças ao protocolo MQTT e define parâmetros seguros para autenticação em manutenção digital.	Eleva o nível de segurança de comunicação entre sensores industriais e sistemas back-end, prevenindo acessos não autorizados.

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base no Quadro 3 do documento, os principais achados evidenciam uma evolução significativa na literatura de manutenção, especialmente no que tange à integração entre abordagens teóricas robustas e soluções práticas aplicáveis em contextos industriais. Notam-se esforços consistentes na construção de modelos

teóricos para análise de competências (Antosz, 2018), agendamento inteligente (Liu *et al.*, 2018), arquiteturas baseadas em IIoT (Balogh *et al.*, 2018) e avaliação da qualidade de dados (Madhikermi *et al.*, 2016). Estas contribuições reforçam a consolidação de paradigmas voltados à digitalização e à inteligência nos sistemas de manutenção. Outro ponto central recai sobre a incorporação de modelos multicritério e heurísticos, como AHP, VIKOR e raciocínio baseado em casos, os quais fortalecem a fundamentação das decisões e ampliam a aplicabilidade dos resultados (Zhu, Xin; Jing, 2022; Liu *et al.*, 2020). A literatura também revela atenção crescente à segurança da informação em ambientes de manutenção inteligente, com ênfase na criptografia e autenticação via hardware seguro, conforme proposto por Lesjak *et al.* (2015).

Do ponto de vista prático, os estudos avaliados oferecem contribuições concretas para o aprimoramento da eficiência operacional, redução de custos e suporte à tomada de decisão. Entre os exemplos, destacam-se a implementação de sistemas de apoio à decisão com base em sensores remotos e alertas automatizados (Aiello *et al.*, 2021), a priorização de intervenções baseada na criticidade dos equipamentos (Dziabas; Deja, Wiśniewska, 2022) e a avaliação comparativa da performance de unidades operacionais por meio de indicadores híbridos (Sarfaraz *et al.*, 2023). Além disso, o uso de modelos colaborativos em roteamento de manutenção (Qin, Ng; Sun, 2024) e o foco em sustentabilidade e flexibilidade nos agendamentos (Lu *et al.*, 2025) demonstram a preocupação em alinhar os sistemas de manutenção às diretrizes da Indústria 4.0 e 5.0. Essas práticas não apenas otimizam a disponibilidade de ativos, mas também elevam a maturidade organizacional em gestão da manutenção.

2.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos revelam um panorama rico e multifacetado sobre a evolução teórica e prática da gestão e eficiência da manutenção. A análise temporal dos artigos mostra uma intensificação da produção científica nos anos mais recentes, especialmente entre 2015 e 2025, com destaque para os anos de 2016 e 2018, o que confirma o crescente interesse pelo tema e a sua relevância estratégica. Os termos recorrentes na nuvem de palavras — como 'maintenance', 'quality', 'information' e 'decision' — reforçam essa tendência, revelando uma convergência entre os campos da engenharia, gestão e tecnologia.

Os objetivos e métodos revelam uma diversidade significativa de enfoques, desde investigações empíricas (Antosz, 2018) até formulações matemáticas robustas (Lu *et al.*, 2025; Qin; Ng; Sun, 2024). Essa pluralidade é crucial, pois demonstra que a eficiência da manutenção não pode ser compreendida ou promovida por uma única abordagem. (Antosz, 2018) destaca uma lacuna significativa nas competências das equipes, com apenas 33% dos trabalhadores atendendo aos requisitos mínimos, ressaltando a urgência de alinhamento entre qualificação e exigências operacionais. Se propõem modelos heurísticos com mapeamento inteligente de manutenção, que otimizam o agendamento de tarefas e a priorização de serviços com base em algoritmos genéticos e raciocínio baseado em casos (Liu, Ru *et al.*, 2020; Liu, Y. *et al.*, 2018).

A contribuição prática dos estudos também é evidente. Balogh *et al.* (2018) propõem uma arquitetura colaborativa baseada em IIoT para ambientes fabris, enquanto Aiello *et al.* (2021) desenvolvem um SAD com uso de blockchain, permitindo decisões de manutenção orientadas por dados em tempo real. Zhu, Xin e Jing (2022) aplicam AHP-VIKOR para seleção de fornecedores, reforçando a aplicação de métodos multicritério para garantir decisões mais transparentes e eficientes. Da mesma forma, Sarfaraz *et al.* (2023) introduzem o índice MRRW, combinando DEA e FIS para mensurar a eficiência de unidades de manutenção hídrica, fornecendo avaliações mais precisas que os modelos tradicionais.

Do ponto de vista organizacional, Dziabas, Deja e Wiśniewska (2022) propõem um modelo híbrido que combina manutenção reativa, preventiva e baseada na condição, mostrando impactos diretos na extensão dos intervalos de reparo. Lam (2008) reforça a importância de critérios como 'value for money' para contratação de serviços de manutenção predial, enquanto Madhikermi *et al.* (2016) desenvolvem painéis para avaliar qualidade de reportes de manutenção sob critérios como veracidade, completude e tempestividade.

Outros estudos abordam o contexto de manutenção em setores específicos. Matusevych (2016) utiliza lógica fuzzy para avaliar manutenção ferroviária. Meng *et al.* (2011) e Lesjak *et al.* (2015) exploram estratégias de segurança em serviços inteligentes, com foco em autenticação e integridade dos dados. Chu, Yu e Wang (2014) propõem um sistema de treinamento centrado no usuário para manutenção aeronáutica, enquanto Robson *et al.* (2015) modelam intervalos ideais para inspeções em válvulas de segurança, com impactos diretos em confiabilidade e segurança.

As contribuições teóricas são robustas: modelos de avaliação de competência (Antosz, 2018), agendamentos distribuídos (Lu *et al.*, 2025), arquiteturas colaborativas (Balogh *et al.*, 2018), modelos heurísticos (Liu *et al.*, 2020), e painéis de qualidade da informação (Madhikermi *et al.*, 2016). Estas propostas ampliam a fronteira conceitual da manutenção e sustentam um corpo teórico mais alinhado à realidade complexa da Indústria 5.0. Igualmente relevantes são as aplicações práticas, que incluem sistemas de apoio à decisão, algoritmos de priorização, estratégias colaborativas e métricas inovadoras de eficiência.

Os principais achados indicam que a literatura contemporânea tem se movido no sentido de integrar os avanços tecnológicos às necessidades práticas das equipes de manutenção. Contudo, a revisão também evidencia que ainda são escassos os modelos replicáveis voltados à avaliação integrada da eficiência dessas equipes, especialmente em contextos organizacionais dinâmicos. Essa constatação reforça a importância do presente estudo e valida o esforço de identificar elementos teóricos e práticos que sirvam de base para melhorias reais na gestão da manutenção industrial.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo identificar elementos práticos e teóricos para gestão e eficiência da manutenção, partindo da constatação de que os desafios enfrentados pelas equipes de manutenção vão muito além da simples aplicação de técnicas operacionais. A partir da análise sistemática de 17 artigos científicos, foi possível observar uma significativa evolução teórica no campo da manutenção, aliada à incorporação de soluções práticas orientadas por tecnologia, inteligência artificial, internet das coisas (IoT) e modelos multicritério.

A revisão demonstrou que os objetivos propostos foram plenamente atingidos. Do ponto de vista teórico, destacaram-se propostas que buscam estruturar modelos decisórios, algoritmos de ranqueamento e métodos quantitativos aplicáveis à realidade das organizações. Já em termos práticos, foram identificadas soluções robustas voltadas à eficiência de sistemas de manutenção, à qualificação de equipes, à priorização de tarefas e à avaliação de desempenho. A convergência entre teoria e prática se mostrou fundamental para o fortalecimento do campo, oferecendo alternativas viáveis para contextos variados, como o setor ferroviário, aeronáutico, predial e de saneamento.

Além disso, a análise evidenciou a escassez de modelos integradores que considerem simultaneamente aspectos humanos, tecnológicos e organizacionais. Nesse sentido, este estudo contribui ao mapear as principais abordagens contemporâneas e destacar lacunas que ainda precisam ser exploradas pela academia. Os achados tornam-se especialmente relevantes no contexto da indústria, em que se demanda flexibilidade, personalização e inteligência nas operações de manutenção. Os resultados aqui apresentados servem de base para novos modelos gerenciais e para o aprimoramento contínuo das práticas de manutenção em organizações públicas e privadas.

2.6 REFERÊNCIAS

- AIELLO, G. *et al.* A decision support system to assure high-performance maintenance service. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 651–670, 2021.
- ANTOSZ, K. Maintenance - Identification and analysis of the competency gap | Utrzymanie ruchu - Identyfikacja i analiza luki kompetencyjnej. **Eksplotacja i Niezawodnosc**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 484–494, 2018.
- ASKARI, Ali *et al.* Operation and Maintenance (O&M) Risks Management Based on the Hazard and Effect Management Index (HEMI) in an Oilfield. **Journal of Chemical Health Risks**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 157–168, 2025.
- BALOGH, Z *et al.* Reference Architecture for a Collaborative Predictive Platform for Smart Maintenance in Manufacturing. In: , 2018, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA. (A Szakal, Org.)**2018 IEEE 22ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ENGINEERING SYSTEMS (INES 2018)**. 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2018. p. 299–303.
- BRIK, Abdelkarim Ait; EN-NHAILI, Ahmed; MEDDAOUI, Anwar. Enhancing Operational Performance through Digitalization and Industry 4.0: A Comprehensive Model for Data Reliability and OEE Optimization. **Data and Metadata**, [s. l.], v. 4, p. 475, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.56294/dm2025475>.
- CHU, Jianjie; YU, Suihuai; WANG, Wenjun. Research on Computer Aided Aircraft Maintenance Training and Evaluation System Based on User-Centered Design. In: , 2014, LAUBLSRUTISTR 24, CH-8717 STAFA-ZURICH, SWITZERLAND. (G Yang, Org.)**INTELLIGENT MATERIALS AND MECHATRONICS**. LAUBLSRUTISTR 24, CH-8717 STAFA-ZURICH, SWITZERLAND: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2014. p. 328–332.
- FARIAS, Pablo de Carvalho. Mineração 4.0: otimização da manutenção preditiva através da análise de vibração. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. e6690, 2024.

DZIABAS, T.; DEJA, M.; WIŚNIEWSKA, A. A Strategy for Managing the Operation of Technical Infrastructure Based on the Analysis of “Bad Actors”—A Case Study of LOTOS Group S.A. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 8, 2022.

HSU, Hsin-Wei *et al.* Toward sustainability of Waste-to-Energy: An overview. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 321, p. 119063, 2024.

LAM, T.Y.M. Procuring professional housing maintenance services. **Facilities**, [s. l.], v. 26, n. 1–2, p. 33–53, 2008.

LESJAK, C. *et al.* Securing smart maintenance services: Hardware-security and TLS for MQTT. *In:* , 2015. **Proceeding - 2015 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2015**. [S. l.: s. n.], 2015. p. 1243–1250.

LIU, Y. *et al.* An overview on smart maintenance service scheduling system and theoretical basis for agricultural machinery. *In:* , 2018. **Proceedings - IEEE 2018 International Congress on Cybermatics: 2018 IEEE Conferences on Internet of Things, Green Computing and Communications, Cyber, Physical and Social Computing, Smart Data, Blockchain, Computer and Information Technology, iThings/Gree**. [S. l.: s. n.], 2018. p. 766–771.

LIU, Ru *et al.* Coordinating contracts for a wind-power equipment supply chain with joint efforts on quality improvement and maintenance services. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, v. 243, 2020.

LIU, Q. *et al.* Heuristic decision of planned shop visit products based on similar reasoning method: From the perspective of organizational quality-specific immune. **Open Physics**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 126–138, 2020.

LU, S. *et al.* Distributed maintenance task scheduling for multiple technician teams considering uncertain durations and deterioration effects towards Industry 5.0. **International Journal of Production Research**, [s. l.], 2025.

MADHIKERMI, Manik *et al.* Data quality assessment of maintenance reporting procedures. **EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 63, p. 145–164, 2016.

MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 5, n. 7, p. 8913–8923, 2019.

MATUSEVYCH, O O. METHODOLOGY OF DETERMINATION OF QUALITY INDEX OF MAINTENANCE SERVICE SYSTEM OF POWER EQUIPMENT OF TRACTION SUBSTATIONS. **ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS**, VUL FRUNZE 21, KHARKIV, 61002, UKRAINE, n. 1, p. 59–64, 2016.

MENG, G.; YANLI, J.; XUEMEI, C. Research on E- intelligent maintenance service mechanism and function realization. *In:* , 2011. **Proceedings - 2011 International Conference on Internet Computing and Information Services, ICICIS 2011**. [S. l.: s. n.], 2011. p. 459–461.

- POLLOCK, Alex; BERGE, Eivind. How to do a systematic review. **International Journal of Stroke**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 138–156, 2018.
- QIN, Y.; NG, K.K.H.; SUN, X. Service accessibility strategy for aircraft maintenance routing with interorganizational collaborations on outsourcing maintenance. **Computers and Industrial Engineering**, [s. l.], v. 190, 2024.
- ROBSON, H. *et al.* Delivering improved asset integrity and increased production efficiency through the targeted maintenance of pressure safety valves. In: , 2015. **Society of Petroleum Engineers - SPE Offshore Europe Conference and Exhibition, OE 2015**. [S. l.: s. n.], 2015.
- RÜCKER, K *et al.* **Using Stable Diffusion Model for Text-Driven Generation in Augmented Reality Applications**. [S. l.: s. n.], 2025. v. 1242 LNNS
- SARFARAZ, A.H. *et al.* Assessing repair and maintenance efficiency for water suppliers: a novel hybrid USBM-FIS framework. **Operations Management Research**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 1321–1342, 2023.
- SHAO, Z; KUMRAL, M. Logical analysis of data in predictive failure detection and diagnosis. **International Journal of Quality and Reliability Management**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 401–424, 2025.
- SOTT, Michele Kremer *et al.* Process modeling for smart factories: using science mapping to understand the strategic themes, main challenges and future trends. **Business Process Management Journal**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 1391–1417, 2021.
- TIAN, G. *et al.* Addressing a Collaborative Maintenance Planning Using Multiple Operators by a Multi-Objective Metaheuristic Algorithm. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, [s. l.], v. 22, p. 606–618, 2025.
- TYAGI, A K *et al.* **Artificial Intelligence-Enabled Digital Twin for Smart Manufacturing**. [S. l.]: Wiley, 2024.
- WANG, Jingjing; HAN, Honggui. A learning-based memetic algorithm for energy-efficient distributed flow-shop scheduling with preventive maintenance. **Swarm and Evolutionary Computation**, [s. l.], v. 92, p. 101772, 2025.
- ZHU, Z.; XIN, Y.; JING, Y. Analysis on AHP-VIKOR-based Supplier Selection for Large Equipment Maintenance of Construction Enterprises. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 42–48, 2022.

3 ARTIGO 2 – MENSURAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO COM APOIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS: EVIDÊNCIAS DE UM ESTUDO DE CASO NO SUPERMERCADO DE UMA COOPERATIVA

RESUMO: Este artigo propõe, aplica e valida um modelo de mensuração da eficiência em serviços de manutenção em supermercados, fundamentado na Análise Envoltória de Dados (DEA) e ajustado à realidade operacional de equipes em campo. A pesquisa foi desenvolvida no supermercado de uma cooperativa, contemplando 18 equipamentos, definidos por seu nível de importância produtiva, monitorados durante 36 meses. O modelo adotado seguiu uma abordagem input-oriented com retornos constantes à escala (CRS), considerando como inputs o tempo médio de reparo (MTTR), os custos de mão de obra e peças de manutenção, e como outputs o tempo médio entre falhas (MTBF) e a disponibilidade dos equipamentos. Os resultados evidenciam contrastes significativos de desempenho. Duas DMUs (15 e 16) atingiram eficiência plena, estabelecendo-se como benchmarks internos. Em contrapartida, equipamentos críticos (como DMUs 01, 02 e 03) apresentaram múltiplas fragilidades, com altos custos e baixa confiabilidade. A análise de folgas demonstrou que os principais desafios se concentram na dimensão financeira da manutenção, enquanto a disponibilidade já se encontra em patamares adequados. A etapa de benchmarking identificou dois perfis de referência distintos, possibilitando estratégias de melhoria adaptadas ao nível de maturidade de cada unidade. O estudo avança na literatura ao aplicar a DEA em um contexto pouco explorado, fornecendo contribuições teóricas e práticas para a gestão da manutenção.

PALAVRAS-CHAVES: Eficiência operacional; Data Envelopment Analysis; Cooperativas; Manutenção industrial; Gestão da Manutenção

3.1 INTRODUÇÃO

A crescente competitividade em setores industriais e de serviços tem destacado a importância da gestão eficiente da manutenção, que vai além da simples conservação de ativos, configurando-se como fator chave para elevar a produtividade, reduzir custos operacionais e minimizar paradas inesperadas. Em contextos cada vez mais dinâmicos, nos quais disponibilidade e confiabilidade de ativos são essenciais, a

manutenção estratégica consolida-se como um elemento central das estratégias corporativas (Dashtaki; Jafari; Hoseinie, 2025; March; Scudder, 2019; Marques; Brito, 2019; Tang, 2025).

No cenário contemporâneo, a digitalização das práticas de manutenção é uma realidade impulsionada pelas tecnologias digitais da Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA), gêmeos digitais e realidade aumentada vêm transformando os processos decisórios, permitindo diagnósticos preditivos, intervenções mais precisas e uma gestão orientada por dados (Ait Brik; En-nhaili; Meddaoui, 2025; Lina; Zexuan; Xiangzhu, 2022). Este novo paradigma exige modelos analíticos robustos que integrem aspectos técnicos, humanos e organizacionais. Neste sentido a literatura aponta que a eficiência das operações de manutenção não depende exclusivamente da tecnologia empregada, mas também da forma como os recursos são geridos, do grau de qualificação das equipes e das condições organizacionais e operacionais envolvidas (Askari *et al.*, 2025; Farias, 2024). Nesse cenário, diferentes autores têm explorado abordagens que vão desde a avaliação de competências em manutenção industrial (Antosz, Katarzyna, 2018), até o desenvolvimento de arquiteturas colaborativas baseadas em IoT para ambientes fabris (Balogh *et al.*, 2018). Outras contribuições incluem o uso de algoritmos heurísticos para agendamento de tarefas técnicas (Liu, Yu *et al.*, 2018), propostas de modelos de priorização em contextos complexos e distribuídos (Lu *et al.*, 2025), e metodologias multicritério aplicadas à seleção de fornecedores de manutenção (Zhu *et al.*, 2022). Essas pesquisas convergem no esforço de alinhar tecnologias emergentes a estratégias operacionais mais inteligentes, responsivas e integradas.

A Análise Envoltória de Dados (DEA – *Data Envelopment Analysis*) é uma ferramenta analítica abrangente para lidar com esse contexto. Por tratar-se de uma técnica não paramétrica capaz de mensurar a eficiência relativa entre unidades de decisão com múltiplos insumos e produtos, a DEA permite comparações internas e identificação de benchmarks, sem exigir funções de produção previamente definidas (González-de-Julián; Vivas-Consuelo; Barrachina-Martínez, 2024). Temos exemplos da aplicação de DEA em diferentes casos e características, como por exemplo, indústria de comida (Lu *et al.*, 2026), eficiência energética (Esfandyari; Moghaddam, 2025), produção de trigo (Radmand *et al.*, 2025), healthcare (Zulfakhar Zubir *et al.*, 2025), hospitais (Hadian *et al.*, 2025; Jiang *et al.*, 2025), logística marítima (Delfin-Ortega, 2025), eficiência de aeroportos (Yang; Zhang; Wei, 2025), gestão de projetos

industriais (Coelho *et al.*, 2023), dentro outras aplicações. Um exemplo relevante de aplicação da DEA em contexto de manutenção é apresentado por (Sarfaraz *et al.*, 2023), que avaliaram o desempenho de equipes de manutenção em companhias de abastecimento de água por meio de um modelo DEA adaptado às características do setor. O estudo utilizou indicadores como MTBF (Mean Time Between Failures), MTTR (Mean Time To Repair) e RTO (Ready To Operate), demonstrando que a técnica é viável para apoiar diagnósticos mais precisos da eficiência organizacional em sistemas de manutenção distribuídos.

Apesar desses avanços, são ainda limitados os estudos que articulam dados operacionais, como número de técnicos, custo de manutenção e produtividade, com indicadores de resultado consolidados. Essa carência compromete o uso da análise de eficiência como instrumento sistemático de melhoria contínua. Neste artigo, propõe-se desenvolver, aplicar e refinar um método para medição de eficiência em serviços de manutenção externa com base na Análise Envoltória de Dados (DEA), utilizando como estudo caso o supermercado de uma cooperativa. O modelo proposto será construído com base em evidências empíricas e adaptado à realidade de equipes móveis, sendo testado por meio de dados reais de operação em campo. Para este feito o artigo tem como objetivo (i) propor um modelo para medição da eficiência em serviços de manutenção, fundamentado em DEA e ajustado à realidade operacional de equipes em campo; e (ii) aplicar e validar esse modelo em um estudo de caso real, utilizando os resultados para refinamento metodológico e proposição de melhorias operacionais.

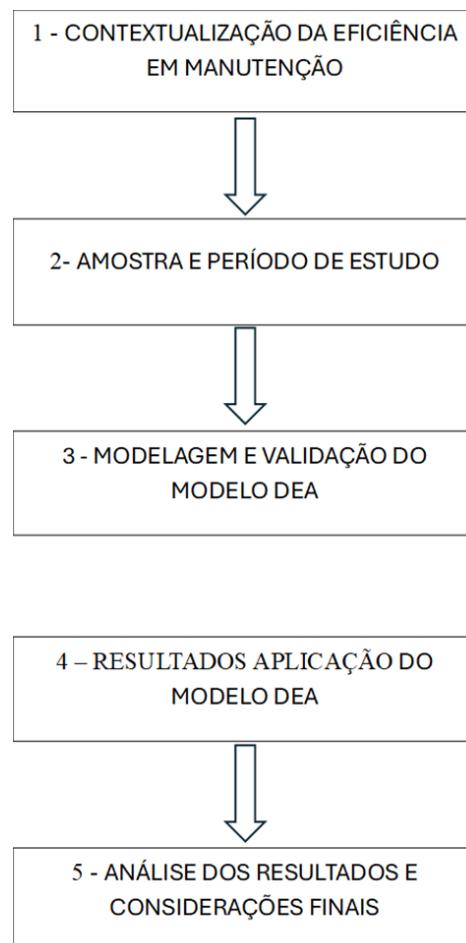
Esta pesquisa se justifica tanto do ponto de vista teórico quanto prático. Do ponto de vista teórico, o estudo avança na literatura ao aplicar e adaptar a DEA a um contexto ainda pouco explorado, ou seja, na avaliação de eficiência de serviços de manutenção externos, prestados por equipes móveis, sob condições operacionais adversas e variáveis. Do ponto de vista prático, os resultados esperados incluem a geração de indicadores comparativos de desempenho entre equipes, identificação de oportunidades de melhoria e suporte à tomada de decisão gerencial baseada em evidências. Tais contribuições são especialmente valiosas para organizações que atuam em setores de infraestrutura, agronegócio, energia, cooperativas e outros em que a manutenção em campo é estratégica para a continuidade operacional. Este artigo tem as seções de materiais e métodos, resultados, análise dos resultados e considerações finais.

3.2 MATERIAIS E MÉTODO

Este estudo foi conduzido com o objetivo de propor, aplicar e refinar um modelo para mensuração da eficiência de serviços de manutenção, tendo como base a metodologia de Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA). O modelo desenvolvido busca refletir a realidade operacional de equipes de campo, considerando variáveis típicas de ambientes descentralizados, como restrições de tempo, diversidade de ativos e variações no consumo de peças para manutenção.

A pesquisa se estrutura em duas etapas complementares: (i) proposição de um modelo de medição de eficiência adequado à manutenção, a partir de uma estrutura DEA orientada a insumos; e (ii) aplicação e validação do modelo por meio de um estudo de caso real em um supermercado da cooperativa, com posterior refinamento metodológico com base na análise crítica dos resultados e na consulta a especialistas. A figura 3 apresenta as etapas metodológicas da pesquisa.

Figura 3 – Etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1 Contextualização da eficiência em manutenção

A busca pela eficiência tem sido um dos pilares da gestão em diferentes áreas organizacionais, envolvendo desde projetos complexos até operações industriais rotineiras. No âmbito da manutenção, eficiência pode ser entendida como a capacidade de otimizar o uso de recursos humanos, financeiros e técnicos, de modo a assegurar a confiabilidade dos ativos, reduzir paradas não programadas e prolongar a vida útil dos equipamentos. Esse conceito ultrapassa a noção de simples redução de custos, envolvendo também a geração de valor estratégico para a organização, especialmente em ambientes industriais caracterizados por alta competitividade e restrições operacionais (Taher *et al.*, 2021).

A literatura destaca que a eficiência depende da habilidade em equilibrar múltiplos fatores simultaneamente — como tempo, custo, qualidade e confiabilidade — diante da incerteza inerente aos sistemas produtivos. Esse equilíbrio demanda flexibilidade operacional e mecanismos de controle capazes de lidar com diferentes níveis de complexidade, garantindo que os recursos sejam alocados de forma racional e alinhada às metas estratégicas (Hansen *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2020).

Em ambientes de manutenção industrial, a avaliação da eficiência revela-se ainda mais relevante, pois a indisponibilidade de ativos críticos pode comprometer a continuidade operacional e a competitividade da empresa. Modelos de análise quantitativa permitem mensurar como variáveis de entrada — como custos de peças, mão de obra e tempo de reparo — se convertem em resultados de saída — como confiabilidade (MTBF) e disponibilidade. Dessa forma, a mensuração da eficiência torna-se não apenas um diagnóstico, mas também um instrumento para apoiar a tomada de decisão, priorizando intervenções em ativos críticos e difundindo práticas de excelência entre unidades semelhantes (Oliveira; Martins, 2018; Viglioni; Cunha; Moura, 2016).

Para compreender a eficiência no contexto da manutenção industrial oferece a base conceitual necessária para a aplicação de métodos robustos de análise comparativa. Entre esses métodos, destaca-se a Análise Envoltória de Dados (DEA), que possibilita avaliar múltiplos equipamentos de forma integrada, identificando benchmarks internos e apontando oportunidades de melhoria contínua. Essa ponte entre a teoria da eficiência e a prática de gestão justifica a utilização da DEA como instrumento central deste estudo.

3.2.2 Amostra e Período de Estudo

O estudo de caso foi desenvolvido em um supermercado da cooperativa, onde foram avaliados 18 equipamentos industriais com significativa representatividade na produção e criticidade das manutenções. A seleção desses ativos considerou sua relevância para o funcionamento do supermercado e o histórico consistente de registros de manutenção. O período analisado compreende 36 meses consecutivos, entre 1º de julho de 2022 e 30 de junho de 2025. Os equipamentos considerados na análise estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Equipamentos avaliados no estudo

Equipamento #	Descrição do Equipamento
1	FRITADEIRA A GÁS ÓLEO 45L FOG 3C 127V/220V
2	FORNO INDUSTRIAL ELÉTRICO COMBINADO C10 380V PRÁTICA
3	MÁQUINA DE BISCOITOS DROP TOP 400450 PLUS BRALYX
4	BATEDEIRA INDUSTRIAL 40 L
5	CÂMARA DE FERMENTAÇÃO/RETARDO 20 BANDEJAS CFCK20 G4 220V
6	CILINDRO LAMINADOR AUTOMÁTICO CLA-600
7	MASSEIRA COZEDORA HOTMIXER PLUS 70 L BRALYX
8	FORNO VIPÃO UNO GÁS C/CAVALETE INOX 380V 60HZ TRIF
9	SERRA FITA SUPER INOX FAM-400
10	PICADOR DE CARNE ELÉTRICO FAM 106 SUPER INOX
11	AMASSADEIRA ESPIRAL AE040 380V TRIF 60HZ
12	CALDEIRAO INDUSTRIAL GERCO A GAS 200L C/ TAMPA AMERICANA
13	LAVADORA DE LOUCA HOBART INDL
14	MÁQUINA EMBALADORA AUTOMATICA WALDYSSA ELIXA ZX
15	MÁQUINA P/CORTAR BIFES
16	MOINHO PARA PAO MF80-1S220V C/1 SAIDA
17	FRITADEIRA ELETRICA SE-42E O SMART CONTROL 220V TRIF
18	MODELADORA DE PAO MP 50 INOX MONO 220V

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada equipamento (denominados de DMUs) foram coletadas informações relativas a: (i) MTBF; (ii) tempo médio de execução por OS (MTTR); (iii) O custo total de mão de obra para a execução das manutenções no período de 36 meses; (iv) O custo peças reparo de manutenções no período de 36 meses; (v) Disponibilidade dos equipamentos no período.

Os dados completos estão detalhados no Apêndice A desta dissertação, sendo tratados com base mensal para alimentar o modelo DEA. Os dados consolidados por apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Indicadores individuais de manutenção

Equipamento # (DMU)	MTBF (h)	MTTR (h)	Custo total de mão de obra	Custo peças reparo	Disponibilidade
1	183,66 hrs	1,35 hrs	R\$ 8.290,78	R\$ 12.877,33	99,2704%
2	190,11 hrs	1,30 hrs	R\$ 7.689,11	R\$ 11.626,90	99,3208%
3	197,02 hrs	1,48 hrs	R\$ 8.474,89	R\$ 10.180,54	99,2546%
4	200,67 hrs	1,24 hrs	R\$ 6.935,08	R\$ 9.215,66	99,3859%
5	208,38 hrs	1,15 hrs	R\$ 6.235,47	R\$ 8.890,43	99,4514%
6	208,38 hrs	1,38 hrs	R\$ 7.441,38	R\$ 7.548,31	99,3424%
7	212,47 hrs	1,42 hrs	R\$ 7.492,94	R\$ 6.360,70	99,3365%
8	216,72 hrs	1,30 hrs	R\$ 6.684,75	R\$ 5.980,48	99,4040%
9	221,14 hrs	1,29 hrs	R\$ 6.563,54	R\$ 5.695,32	99,4201%
10	225,75 hrs	1,20 hrs	R\$ 5.976,30	R\$ 4.975,70	99,4713%
11	252,00 hrs	1,05 hrs	R\$ 4.704,27	R\$ 4.126,28	99,5850%
12	264,29 hrs	0,90 hrs	R\$ 3.837,72	R\$ 3.978,23	99,6606%
13	204,45 hrs	1,36 hrs	R\$ 5.516,08	R\$ 6.287,20	99,3392%
14	301,00 hrs	0,80 hrs	R\$ 3.746,16	R\$ 4.628,75	99,7349%
15	338,63 hrs	0,50 hrs	R\$ 3.329,47	R\$ 3.836,89	99,8526%
16	373,66 hrs	0,75 hrs	R\$ 3.036,82	R\$ 2.226,64	99,7997%
17	235,57 hrs	1,28 hrs	R\$ 4.776,77	R\$ 5.216,48	99,4596%
18	285,16 hrs	0,94 hrs	R\$ 3.934,30	R\$ 3.732,63	99,6714%

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3 Modelagem e Validação do Modelo DEA

A Análise Envoltória de Dados (DEA) é um método não paramétrico de programação linear que avalia a eficiência relativa de um conjunto de unidades tomadoras de decisão (Decision Making Units – DMUs), considerando simultaneamente múltiplos insumos (inputs) e produtos (outputs). O modelo identifica uma fronteira de eficiência a partir das DMUs de melhor desempenho, permitindo a comparação entre unidades e a definição de benchmarks internos.

No presente estudo, foi adotado o modelo input-oriented com retornos constantes à escala (CRS), adequado para contextos em que se busca reduzir os recursos utilizados (inputs) mantendo os níveis de resultado (outputs) constantes.

Formalmente, a eficiência de uma DMU pode ser representada pelas seguintes equações:

$$\min_{\theta, \lambda} \theta$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{io}, \quad \forall i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro}, \quad \forall r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j \geq 0, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

onde:

- x_{ij} representa a quantidade do input i consumida pela DMU j ;
- y_{rj} representa a quantidade do output r produzida pela DMU j ;
- θ é o escalar de eficiência ($0 < \theta \leq 10$);
- λ_j são os pesos atribuídos às DMUs de referência;
- m e s representam, respectivamente, o número de inputs e outputs;
- n é o número total de DMUs.

Uma DMU é considerada eficiente quando $\theta=1$, isto é, situa-se na fronteira de eficiência, servindo como referência para as demais unidades. Valores de $\theta < 1$ indicam ineficiência relativa, sugerindo que a DMU em análise poderia reduzir proporcionalmente seus insumos enquanto mantém os níveis de outputs.

Assim, o modelo DEA permite não apenas ordenar as DMUs quanto à sua eficiência, mas também projetar alvos de melhoria (targets) e identificar benchmarks internos, fornecendo subsídios objetivos para a gestão da manutenção.

Além do modelo DEA, foi utilizada a análise de agrupamento hierárquico para identificar padrões de similaridade entre os equipamentos avaliados (DMUs). A técnica de *clustering* permite reunir unidades com características próximas de desempenho, favorecendo uma interpretação mais abrangente dos resultados de eficiência.

Optou-se pelo método hierárquico aglomerativo de Ward, representado graficamente por meio de um dendrograma. Essa abordagem apresenta vantagens

em relação a métodos não hierárquicos, como o k-means, pois não exige a definição prévia do número de grupos. Enquanto o k-means requer a escolha antecipada de k clusters e distribui as unidades de acordo com a minimização da variância interna, o dendrograma permite explorar diferentes níveis de agrupamento e posteriormente escolher o número mais adequado de clusters Hair *et al.* (2005).

No presente estudo, foi adotada a divisão em três clusters principais, definida a partir do corte do dendrograma em nível considerado mais consistente. Essa escolha equilibrou a homogeneidade interna dos grupos com a heterogeneidade entre eles, permitindo identificar conjuntos de equipamentos com fragilidades semelhantes ou com desempenhos próximos da fronteira de eficiência.

Foram analisadas 18 unidades de decisão (DMU's), cada uma correspondendo a um equipamento avaliado. Para o desenvolvimento do modelo, os outputs selecionados foram :MTBF (h); e disponibilidade. Os inputs selecionados foram os indicadores de MTTR (h); Custo mão de obra de reparo de manutenção; e Custo peças reparo de manutenção

A validação do modelo ocorreu em duas etapas. Primeiramente, foram analisados os resultados do modelo aplicado ao estudo de caso real, verificando-se a aderência dos escores de eficiência aos padrões esperados com base na experiência prática da empresa. Em seguida, conduziu-se um processo iterativo de validação com especialistas em manutenção e gestão operacional da Cooperativa, que forneceram feedback técnico sobre os resultados, os indicadores utilizados e a interpretação dos dados. Essa etapa ocorreu em múltiplas rodadas de análise e ajustes, permitindo o refinamento progressivo do modelo, inclusive com a proposição de melhorias operacionais voltadas à gestão da manutenção preventiva e controle de custos. Todos os dados foram sistematizados em planilhas de controle e analisados com apoio de software especializado para aplicação dos modelos DEA.

Os resultados apresentados são: Aplicação do DEA e Ranking de DMUs mais eficientes; análise dos alvos e folgas para os indicadores individuais; análise dos benchmarkings.

3.3 RESULTADOS

Os resultados apresentados são estruturados em três seções: Aplicação do DEA e Ranking das DMUs; Análise dos alvos e folgas para os indicadores individuais; e por fim, Análise dos benchmarkings.

3.3.1 Aplicação do DEA e Ranking de DMUs

A aplicação do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA) permitiu ordenar as 18 Unidades de Tomada de Decisão (DMUs) em função de sua eficiência relativa. A Tabela 4 apresenta o ranking final, do maior para o menor score, destacando os benchmarks e evidenciando os contrastes de desempenho entre os equipamentos avaliados.

Tabela 4 – Ranking das DMUs segundo o score de eficiência

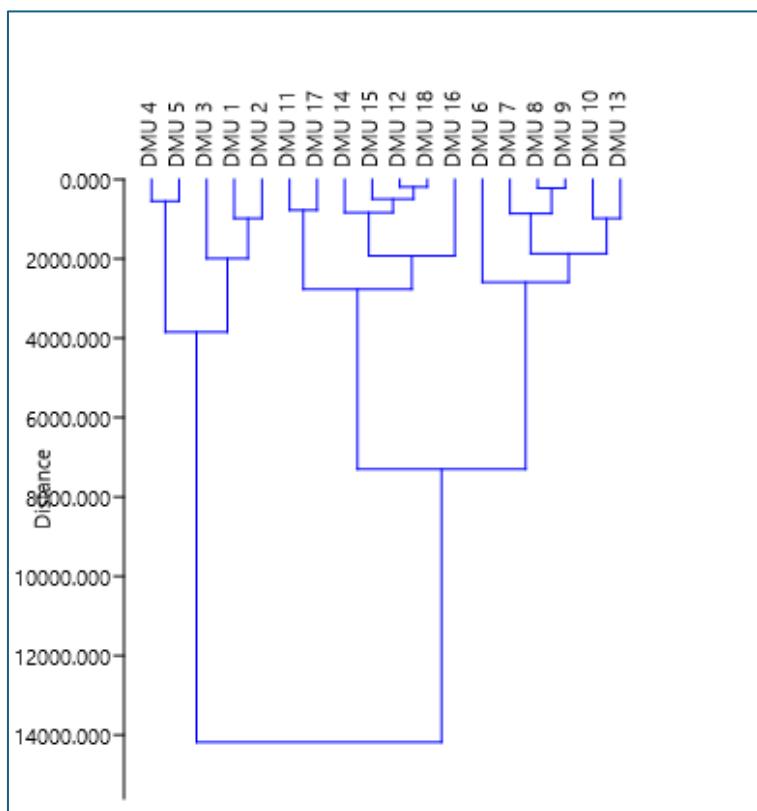
Rank	DMU	Equipamento	Score
1	DMU-15	Máquina para Cortar Bifes	1,00
1	DMU-16	Moinho para Pão MF80-1S220V C/1 Saída	1,00
3	DMU-14	Máquina Embaladora Automática Waldyssa Elixa ZX	0,84
4	DMU-12	Caldeirão Industrial Gerco a Gás 200L	0,80
5	DMU-18	Modeladora de Pão MP 50 Inox	0,78
6	DMU-11	Amassadeira Espiral AE040	0,66
7	DMU-17	Fritadeira Elétrica SE-42E O Smart Control	0,63
8	DMU-10	Picador de Carne Elétrico FAM 106 Super Inox	0,55
8	DMU-13	Lavadora de Louça Hobart Industrial	0,55
10	DMU-05	Câmara de Fermentação/Retardo 20 Bandejas	0,51
11	DMU-09	Serra Fita Super Inox FAM-400	0,50
12	DMU-08	Forno Vipão Uno Gás C/Cavalete Inox	0,49
13	DMU-04	Batedeira Industrial 40 L	0,46
14	DMU-07	Masseira Cozedora Hotmixer Plus 70 L	0,45
15	DMU-06	Cilindro Laminador Automático CLA-600	0,43
16	DMU-02	Forno Industrial Elétrico Combinado C10	0,42
17	DMU-01	Fritadeira a Gás Óleo 45L	0,39
18	DMU-03	Máquina de Biscoitos Drop Top 400450 Plus	0,38

Fonte: Elaborado pelo autor

Complementando a análise dos resultados obtidos via DEA, realizou-se também uma análise de agrupamento hierárquico (*cluster analysis*) a fim de verificar

padrões de similaridade entre as DMUs. Para esse fim, aplicou-se o método de Ward por meio do software Past (versão 4.03), cujo resultado é apresentado no dendrograma da Figura 4. Essa técnica permite identificar grupos de unidades com características de desempenho semelhantes, auxiliando na interpretação dos scores de eficiência e na definição de estratégias gerenciais diferenciadas para cada conjunto.

Figura 4 – Separação em três clusters por dendrograma



Fonte: Software PAST, versão 4.03

A Figura 4 evidencia a formação de três clusters principais. O primeiro cluster é composto pelas DMUs 04, 05, 03, 01 e 02. Este grupo reúne, em sua maioria, equipamentos situados entre as faixas inferiores e intermediárias do ranking de eficiência. Observa-se, por exemplo, que a DMU-03 (Máquina de Biscoitos Drop Top) e a DMU-01 (Fritadeira a Gás Óleo 45L) encontram-se entre os scores mais baixos da Tabela 3, com 0,38 e 0,39, respectivamente. O agrupamento dessas unidades reflete um padrão de baixo desempenho relativo, provavelmente associado a maiores custos de manutenção e disponibilidade reduzida. A proximidade entre a DMU-02 (Forno Industrial Elétrico Combinado C10) e a DMU-01 no dendrograma reforça a

semelhança em suas deficiências operacionais, indicando que tais ativos compartilham desafios semelhantes e, portanto, podem demandar estratégias conjuntas de intervenção. Já as DMUs 04 e 05, ainda que apresentem scores mais próximos da média (0,46 e 0,51), são incorporadas ao cluster por apresentarem características comuns de desempenho subótimo, reforçando a necessidade de atenção gerencial.

O segundo cluster, formado pelas DMUs 11, 17, 14, 15, 12, 18 e 16, concentra os equipamentos mais eficientes. Destaca-se nesse grupo a presença das DMUs 15 e 16, ambas com score 1,00, representando a fronteira de eficiência. A inclusão das DMUs 14 (0,84), 12 (0,80) e 18 (0,78) nesse mesmo agrupamento mostra que tais unidades compartilham padrões de alto desempenho, com custos e tempos de manutenção equilibrados em relação à disponibilidade. A DMU-11 (0,66) e a DMU-17 (0,63), embora não plenamente eficientes, apresentam valores acima da média e se aproximam gradualmente do grupo benchmark, como evidenciado pela união em níveis intermediários no dendrograma. Esse cluster, portanto, representa a referência positiva da amostra, podendo ser explorado como base para difusão de boas práticas internas.

O terceiro cluster reúne as DMUs 06, 07, 08, 09, 10 e 13, caracterizando um grupo de desempenho intermediário abaixo. As DMUs 06 (0,43) e 07 (0,45) situam-se entre as menos eficientes, enquanto as DMUs 08 (0,49) e 09 (0,50) ocupam posições próximas à faixa limítrofe de desempenho aceitável. As DMUs 10 (0,55) e 13 (0,55), embora um pouco mais bem posicionadas, permanecem distantes da fronteira de eficiência. A análise das aproximações no dendrograma indica que as DMUs 08 e 09 formam um subgrupo mais próximo, sugerindo semelhanças diretas em seus padrões operacionais, enquanto as DMUs 10 e 13 também se unem em nível inferior de distância, caracterizando comportamentos semelhantes. Esse conjunto, portanto, demanda atenção moderada, com possibilidade de ganhos por meio de ajustes direcionados.

De forma geral, o dendrograma confirma e complementa os achados do ranking de eficiência, ao organizar as DMUs em grupos com maior homogeneidade interna. Os dois equipamentos plenamente eficientes (DMU-15 e DMU-16) se destacam no cluster de alto desempenho, consolidando seu papel de benchmarks. Por outro lado, os clusters de baixo e médio desempenho ressaltam conjuntos de ativos que compartilham fragilidades semelhantes, oferecendo subsídios para que a Cooperativa

estruture planos de manutenção segmentados e mais assertivos, seja pela priorização de recursos, seja pela difusão de práticas já consolidadas nos equipamentos de referência.

3.3.2 Análise dos alvos e folgas para os indicadores individuais

A análise dos alvos e folgas constitui uma etapa importante na avaliação da eficiência relativa obtida pelo modelo DEA. Enquanto o score evidencia a posição de cada unidade de decisão em relação à fronteira de eficiência, a análise das folgas permite identificar as distâncias específicas entre os valores observados e os valores-alvo projetados pelo modelo, ou seja, aqueles que seriam necessários para que a unidade atingisse 100% de eficiência. Essa leitura granular possibilita compreender de forma mais precisa quais indicadores demandam maior atenção e quais unidades apresentam maior potencial de melhoria com intervenções direcionadas.

No presente estudo, os alvos foram avaliados considerando cinco indicadores principais: o tempo médio de reparo (MTTR), o custo total de mão de obra, o custo de peças de manutenção, o tempo médio entre falhas (MTBF) e a disponibilidade dos equipamentos. Os valores de alvo projetados refletem as metas necessárias para que cada equipamento alcance a fronteira de eficiência, que estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Folga dos indicadores para o alvo

DMU	MTTR (hrs)	Custo mão de obra	Custo peças reparo	MTBF	Disponibilidade
DMU-01	0,818	5021,61	9288,83	157,94	0
DMU-02	0,750	4438,16	8146,54	154,07	0
DMU-03	0,915	5243,43	6798,30	149,03	0
DMU-04	0,664	3712,38	5900,97	147,42	0
DMU-05	0,558	3027,81	5668,48	142,01	0
DMU-06	0,786	4240,41	4347,44	142,01	0
DMU-07	0,776	4349,86	3479,00	144,88	0
DMU-08	0,663	3531,36	3051,59	139,89	0
DMU-09	0,642	3422,38	2836,43	137,06	0
DMU-10	0,536	2852,65	2221,06	134,96	0
DMU-11	0,359	1607,66	1537,73	112,82	0
DMU-12	0,181	770,64	1563,96	104,67	0
DMU-13	0,614	2492,13	4064,54	167,34	0
DMU-14	0,132	616,87	1881,45	60,98	0
DMU-15	0,000	0,00	0,00	0,00	0
DMU-16	0,000	0,00	0,00	0,00	0
DMU-17	0,533	1750,30	2997,43	136,82	0

DMU-18	0,210	879,19	1386,14	85,33	0
--------	-------	--------	---------	-------	---

Fonte: Elaborado pelo autor

As maiores folgas de MTTR concentram-se nas DMU-03 (0,915h), DMU-01 (0,818h), DMU-06 (0,786h) e DMU-07 (0,776h). Esses resultados sugerem processos de reparo extensos, que, ao serem reduzidos, poderiam gerar ganhos diretos de eficiência. O tempo elevado pode estar ligado tanto à complexidade técnica dos equipamentos quanto a falhas na alocação de equipes e recursos.

Por outro lado, as menores folgas estão nas DMU-14 (0,132h), DMU-12 (0,181h), DMU-18 (0,210h) e DMU-11 (0,359h). Nesses casos, as metas projetadas pelo modelo estão próximas da prática atual, sugerindo que ajustes pontuais — como padronização de procedimentos e treinamento direcionado — seriam suficientes para alcançar a eficiência plena.

No custo de mão de obra, os maiores desvios foram registrados nas DMU-03 (R\$ 5.243,43), DMU-01 (R\$ 5.021,61), DMU-02 (R\$ 4.438,16) e DMU-07 (R\$ 4.349,86). Esses valores evidenciam alto comprometimento financeiro com execução de ordens de serviço, o que pode refletir tanto excesso de horas-homens quanto baixa produtividade das intervenções. Já as menores folgas ocorreram nas DMU-14 (R\$ 616,87), DMU-12 (R\$ 770,64), DMU-18 (R\$ 879,19) e DMU-11 (R\$ 1.607,66). Esse grupo demonstra maior racionalização do uso da mão de obra, podendo atingir a fronteira de eficiência com estratégias simples de reorganização das equipes ou redistribuição de tarefas.

As maiores folgas para custos de peças aparecem nas DMU-01 (R\$ 9.288,83), DMU-02 (R\$ 8.146,54), DMU-03 (R\$ 6.798,30) e DMU-04 (R\$ 5.900,97). Isso indica dependência significativa de insumos externos, tornando as manutenções mais onerosas. Nessas unidades, políticas de compras estratégicas, padronização de componentes ou renegociação de contratos com fornecedores seriam alternativas de melhoria. Por outro lado, as menores folgas foram observadas nas DMU-18 (R\$ 1.386,14), DMU-11 (R\$ 1.537,73), DMU-12 (R\$ 1.563,96) e DMU-14 (R\$ 1.881,45). Esses valores sugerem que, nesses casos, os custos com peças já estão em patamares próximos ao ideal, demandando apenas monitoramento contínuo para evitar aumentos futuros.

Em relação ao MTBF, as maiores folgas foram identificadas na DMU-13 (167,34h), DMU-01 (157,94h), DMU-02 (154,07h) e DMU-03 (149,03h). Isso

demonstra que esses equipamentos apresentam falhas recorrentes, exigindo intervenções mais frequentes e aumentando a carga de manutenção. O aumento da confiabilidade, por meio de técnicas preditivas ou maior controle das condições de operação, é estratégico para aproximar esses ativos da fronteira de eficiência. Já as menores folgas de MTBF ocorreram nas DMU-14 (60,98h), DMU-18 (85,33h), DMU-12 (104,67h) e DMU-11 (112,82h). Esses ativos possuem padrões de falha mais espaçados, sugerindo processos de manutenção já consolidados, que podem ser otimizados com reforço de planos preventivos.

A análise da disponibilidade apresenta um padrão distinto, pois todas as unidades, registraram folga zero. Isso significa que, segundo o modelo DEA, a disponibilidade já se encontra em patamar adequado, não constituindo fator de distanciamento da eficiência plena. Esse resultado ressalta que os gargalos principais estão concentrados em custos e tempos de reparo, e não na disponibilidade global dos equipamentos.

A avaliação comparativa dos indicadores permite identificar padrões consistentes. As DMUs 01, 02 e 03 surgem repetidamente entre as quatro maiores folgas em praticamente todos os indicadores (MTTR, custos de mão de obra, custos de peças e MTBF), evidenciando problemas estruturais e múltiplas fragilidades. Isso as coloca no grupo de maior prioridade para intervenção, exigindo um plano abrangente de reestruturação da manutenção, incluindo racionalização de custos, redução do tempo de reparo e fortalecimento da confiabilidade. Por outro lado, as DMUs 12, 14, 18 e 11 aparecem frequentemente entre as quatro menores folgas. Esses resultados apontam para unidades próximas da fronteira de eficiência, nas quais os esforços necessários para atingir o desempenho ótimo são relativamente reduzidos. Nessas unidades, a recomendação é adotar ações pontuais, como ajustes de cronograma, reforço de práticas preventivas e monitoramento de custos.

A análise conjunta também mostra que os custos de mão de obra e de peças são os indicadores mais críticos, com valores significativamente maiores que os observados para MTTR e MTBF. Isso reforça a necessidade de priorizar ações voltadas à gestão financeira da manutenção, como controle mais rigoroso de horas-homens e otimização da política de aquisição de peças.

3.3.3 Análise dos benchmarkings

A etapa de análise dos benchmarkings busca compreender como as unidades ineficientes se projetam em direção às eficientes, identificando quais DMUs funcionam como referências e qual a intensidade dessa relação. Os coeficientes de λ atribuídos pelo modelo DEA indicam o grau de proximidade estrutural entre uma DMU ineficiente e sua referência eficiente, variando de 0 a 1. Valores mais altos sugerem maior aderência e, portanto, menor esforço de adaptação para que a unidade alcance a fronteira. Já valores mais baixos refletem maior heterogeneidade, exigindo transformações estruturais mais complexas. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados de Benchmarking (λ) em relação às DMUs eficientes

DMU	Eficiência Padrão	λ DMU-15	λ DMU-16
DMU-01	0,39	0,85	0,14
DMU-02	0,42	0,79	0,21
DMU-03	0,38	0,73	0,27
DMU-04	0,46	0,68	0,31
DMU-05	0,51	0,62	0,37
DMU-06	0,43	0,61	0,38
DMU-07	0,45	0,41	0,58
DMU-08	0,49	0,44	0,55
DMU-09	0,50	0,40	0,60
DMU-10	0,55	0,33	0,66
DMU-11	0,66	0,23	0,77
DMU-12	0,80	0,12	0,88
DMU-13	0,55	0,00	0,99
DMU-14	0,84	0,32	0,67
DMU-17	0,63	0,00	1,00
DMU-18	0,78	0,08	0,92

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da tabela 6, observa-se que as DMUs ineficientes se distribuem entre duas referências internas: a DMU-15 (Máquina para Cortar Bifes) e a DMU-16 (Moinho para Pão). A DMU-15 funciona como referência para seis unidades (01, 02, 03, 04, 05 e 06), todas situadas na base do ranking de eficiência, com scores entre 0,38 e 0,51. Os valores de λ associados a essas unidades variam de 0,61 a 0,85, demonstrando proximidade suficiente para indicar que o desempenho pode ser ajustado com um esforço moderado. Esse resultado sugere que a DMU-15 exerce papel de benchmark predominante para os ativos mais críticos, servindo como guia de convergência para unidades em patamares de baixa eficiência.

Por outro lado, a DMU-16 aparece como referência para dez unidades (07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 17 e 18), abrangendo a faixa intermediária e superior do ranking. Aqui, os valores de λ tendem a ser mais elevados, com destaque para DMU-12 (0,88), DMU-13 (0,99), DMU-17 (1,00) e DMU-18 (0,92). Essas cifras evidenciam altíssima compatibilidade estrutural entre tais unidades e o benchmark, o que implica que a replicação das práticas operacionais da DMU-16 pode ser feita com maior facilidade e menor risco de insucesso. Nesses casos, ajustes pontuais em cronogramas, padronização de rotinas de inspeção e reforço de técnicas preditivas são suficientes para conduzir à fronteira.

O contraste entre as duas referências permite identificar padrões distintos. As DMUs que se espelham na DMU-15 apresentam ineficiências múltiplas, relacionadas sobretudo a custos elevados e maior tempo médio de reparo, exigindo planos de ação mais estruturais e investimentos significativos para convergência. Já aquelas que projetam a DMU-16 exibem maior maturidade operacional e proximidade com a fronteira, permitindo quick wins mediante replicação direta de boas práticas.

Do ponto de vista gerencial, essa segmentação oferece clareza na formulação de estratégias. Para as unidades com λ altos em relação à DMU-16, recomenda-se adoção imediata das rotinas do benchmark, ajustando apenas variáveis contextuais. Para as unidades ligadas à DMU-15, o caminho é mais complexo, exigindo medidas integradas de controle de custos, reorganização de equipes e revisão de estratégias preventivas.

Além da análise quantitativa conduzida, a etapa de resultados incluiu um processo iterativo de validação com especialistas em manutenção e gestão operacional da Cooperativa. Essa atividade consistiu em múltiplas rodadas de feedback técnico sobre os escores obtidos, os indicadores utilizados e a interpretação

prática dos dados. O diálogo com os profissionais permitiu confrontar os resultados do modelo DEA com a experiência empírica da organização, assegurando que os benchmarks identificados fossem coerentes com a realidade operacional. Como consequência, ajustes finos foram realizados, fortalecendo a robustez do modelo e ampliando sua aplicabilidade como instrumento de apoio à tomada de decisão.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A aplicação do modelo DEA, combinada à análise de clusters hierárquicos, revelou contrastes relevantes entre os dezoito equipamentos avaliados. A formação de três grupos principais pelo dendrograma trouxe maior clareza sobre padrões de eficiência, permitindo interpretar não apenas as posições individuais no ranking, mas também as semelhanças estruturais entre as DMUs. Esse recurso analítico reforça a utilidade do DEA como ferramenta de gestão da manutenção, oferecendo um panorama segmentado para orientar decisões.

O primeiro cluster, formado pelas DMUs 04, 05, 03, 01 e 02, reúne os ativos com maiores fragilidades. Entre eles, destacam-se a DMU-03 e a DMU-01, ambas com scores inferiores a 0,40, configurando-se como casos críticos de ineficiência. A proximidade observada no dendrograma entre a DMU-01 e a DMU-02 sugere que compartilham deficiências semelhantes, especialmente relacionadas a custos elevados e baixa confiabilidade. Já a presença das DMUs 04 e 05 nesse grupo, mesmo com scores intermediários (0,46 e 0,51), indica que apresentam padrões subótimos comuns, distantes da fronteira de eficiência. Esse cluster sinaliza a necessidade de estratégias de reestruturação mais profundas, como revisão de planos preventivos, racionalização de custos de peças e mão de obra, e modernização tecnológica.

O segundo cluster, que inclui as DMUs 11, 17, 14, 15, 12, 18 e 16, representa o grupo de referência da amostra. Dentro dele, as DMUs 15 e 16, ambas plenamente eficientes, estabelecem a fronteira do modelo e configuram benchmarks internos. A inclusão das DMUs 14, 12 e 18, todas com scores superiores a 0,78, reforça que este grupo compartilha práticas de manutenção equilibradas e custos competitivos. As DMUs 11 e 17, embora não estejam na fronteira, demonstram desempenho acima da média, aproximando-se gradualmente dos benchmarks, o que evidencia margem de melhoria com esforços relativamente menores. Este cluster constitui a base para

difusão de boas práticas, sendo estratégico para consolidar rotinas de manutenção preventiva e otimizar custos em toda a organização.

O terceiro cluster reúne as DMUs 06, 07, 08, 09, 10 e 13, caracterizando um grupo intermediário abaixo em termos de eficiência. Nesse conjunto, as DMUs 06 e 07 ocupam posições críticas, com scores inferiores a 0,45, revelando gargalos significativos em custos e tempos de reparo. As DMUs 08 e 09, situadas em torno de 0,50, formam um subgrupo coeso no dendrograma, sugerindo semelhanças operacionais diretas que podem ser exploradas com estratégias comuns de intervenção. Já as DMUs 10 e 13, com scores medianos (0,55), também aparecem agrupadas em nível inferior de distância, indicando convergência de padrões que favorece ajustes direcionados. Esse cluster demanda atenção gerencial moderada: embora não estejam tão distantes da eficiência plena quanto o primeiro grupo, ainda apresentam fragilidades que podem comprometer a competitividade caso não sejam tratadas.

De modo integrado, os resultados do dendrograma confirmam a segmentação em três perfis distintos de equipamentos: críticos, de referência e intermediários. Essa leitura fortalece o papel do DEA ao combinar avaliação individual de eficiência com agrupamentos que revelam proximidades estruturais. Para a empresa, essa classificação oferece suporte direto à formulação de planos de manutenção diferenciados: ações estruturais para os ativos críticos, replicação imediata de boas práticas para os benchmarks e intervenções pontuais para o grupo intermediário. Assim, a análise não apenas hierarquiza o desempenho, mas também define caminhos claros e segmentados para a melhoria contínua na empresa.

A análise das folgas complementa a interpretação dos scores de eficiência, permitindo identificar de forma detalhada quais variáveis afastam cada equipamento da fronteira ótima e quais oferecem maior potencial de melhoria. Ao examinar os cinco indicadores (MTTR, custos de mão de obra, custos de peças, MTBF e disponibilidade), emergem padrões que reforçam a heterogeneidade do parque de equipamentos da cooperativa.

No tempo médio de reparo (MTTR), as maiores folgas concentraram-se nas DMUs 03, 01, 06 e 07, todas acima de 0,75h. Esse grupo revela gargalos operacionais associados a intervenções longas, possivelmente decorrentes da complexidade técnica dos ativos ou da falta de padronização nos procedimentos. Em contraste, as DMUs 14, 12, 18 e 11 apresentaram folgas reduzidas, inferiores a 0,36h, indicando

processos de reparo já próximos do padrão ideal. Nesses casos, treinamentos pontuais e ajustes de rotina seriam suficientes para alcançar a eficiência plena.

Nos custos de mão de obra, as DMUs 03, 01, 02 e 07 apresentaram valores elevados, todos acima de R\$ 4.300,00, sugerindo sobrecarga de horas-homens e baixa produtividade relativa. Já DMUs como 14, 12, 18 e 11 apresentaram folgas muito menores, sinalizando maior racionalização na alocação de equipes. Esse contraste demonstra que a gestão do trabalho humano é um dos principais diferenciais entre os equipamentos críticos e aqueles próximos à fronteira.

O mesmo padrão se repete nos custos de peças. As maiores folgas foram observadas nas DMUs 01, 02, 03 e 04, com valores que variam de R\$ 5.900,00 a R\$ 9.288,83, evidenciando dependência excessiva de insumos externos. Esse cenário abre espaço para ações estratégicas como renegociação de contratos, padronização de componentes e fortalecimento de práticas de manutenção preventiva para reduzir substituições. Em contraponto, as DMUs 18, 11, 12 e 14 demonstraram folgas entre R\$ 1.300,00 e R\$ 1.800,00 estando já em níveis compatíveis com a eficiência esperada.

No MTBF, as maiores folgas surgiram nas DMUs 13, 01, 02 e 03, todas acima de 149h, refletindo ativos sujeitos a falhas recorrentes e baixa confiabilidade operacional. Esse quadro reforça a necessidade de introdução de tecnologias preditivas e de maior controle sobre condições de operação. Já DMUs como 14, 18, 12 e 11 apresentaram folgas muito menores, com destaque para a DMU-14 (60,98h), sugerindo maturidade de processos preventivos.

Um aspecto relevante é que todas as unidades apresentaram folga zero em disponibilidade, evidenciando que, apesar das deficiências em custos e tempos de reparo, os equipamentos mantêm níveis adequados de funcionamento. Isso indica que os gargalos não comprometem diretamente a disponibilidade global, mas encarecem e prolongam os processos de manutenção.

De forma integrada, os resultados evidenciam dois blocos de destaque. O primeiro é formado pelas DMUs 01, 02 e 03, que aparecem reiteradamente entre as maiores folgas em todos os indicadores. Trata-se de equipamentos com fragilidades múltiplas, exigindo planos abrangentes de reestruturação, incluindo racionalização de custos, redução de MTTR e incremento de confiabilidade. O segundo bloco agrupa as DMUs 12, 14, 18 e 11, presentes entre as menores folgas, próximas da eficiência

plena. Nestes ajustes incrementais já são suficientes para alcançar o desempenho ótimo. O Quadro 4 sintetiza esses padrões:

Quadro 4 – Blocos de padrões das DMUs baseados nas folgas

Grupo	DMUs	Principais características	Ações recomendadas
Críticos (maiores folgas)	01, 02, 03	Altos custos, elevado MTTR e baixa confiabilidade (MTBF)	Reestruturação ampla: custos, planos preventivos, maior automação
Intermediários	04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 13, 17	Desvios moderados em custos e MTTR	Ajustes direcionados e reforço de práticas preditivas
Próximos da eficiência	11, 12, 14, 18	Folgas baixas em todos os indicadores	Ações pontuais: treinamento, padronização, monitoramento

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível perceber que a análise das folgas destaca que os maiores desafios da Cooperativa se concentram na dimensão financeira da manutenção, com custos de mão de obra e de peças significativamente acima dos padrões ideais. A superação dessas barreiras exige estratégias gerenciais integradas, enquanto as unidades já próximas da fronteira podem consolidar sua posição com medidas incrementais de baixo custo.

A análise de benchmarking realizada pelo modelo DEA revela dois perfis distintos de referência entre as unidades da empresa. A DMU-15 (Máquina para Cortar Bifes) desonta como benchmark para seis equipamentos (01, 02, 03, 04, 05 e 06), todos concentrados no grupo de menor eficiência, com scores variando entre 0,38 e 0,51. Os valores de λ relativamente altos (0,61–0,85) indicam que, apesar das deficiências, há similaridade estrutural suficiente para que melhorias possam ser alcançadas com ajustes moderados. Esse achado sugere que, mesmo em contextos críticos, há viabilidade de convergência por meio da adoção das práticas já consolidadas na DMU-15, embora provavelmente exigindo investimentos mais robustos em custos e tempo de reparo.

Por outro lado, a DMU-16 (Moinho para Pão) funciona como referência para dez unidades, abrangendo a faixa intermediária e superior do ranking (07 a 18). Neste grupo, os λ alcançam valores próximos de 1,00, como nas DMUs 13 (0,99), 17 (1,00) e 18 (0,92). Isso evidencia uma compatibilidade quase total, o que implica facilidade na replicação de práticas de manutenção, especialmente em aspectos ligados à

padronização de rotinas, monitoramento preditivo e gestão de custos. Tais equipamentos encontram-se próximos da fronteira de eficiência e podem atingir excelência com intervenções incrementais, de baixo custo e rápida implementação.

A dualidade entre as referências aponta para estratégias diferenciadas de gestão. Enquanto as DMUs orientadas à DMU-16 demandam apenas ajustes pontuais para alcançar a eficiência plena, aquelas vinculadas à DMU-15 requerem planos estruturais mais abrangentes, combinando reorganização de equipes, maior disciplina preventiva e possível modernização tecnológica. Essa segmentação reforça a utilidade do DEA não apenas para identificar benchmarks, mas também para definir caminhos distintos de melhoria, adaptados ao nível de maturidade de cada equipamento. O Quadro 5 sintetiza os padrões identificados.

Quadro 5 – Padrões identificados durante a análise do Benchmarking

Benchmark	DMUs associadas	Perfil das Unidades	Valores de λ	Principais Desafios	Ações Recomendadas
DMU-15 (Máquina para Cortar Bifes)	01, 02, 03, 04, 05, 06	Equipamentos da base do ranking, com scores entre 0,38 e 0,51	0,61 – 0,85	Custos elevados de mão de obra e peças, alto MTTR, baixa confiabilidade (MTBF)	Reestruturação ampla: revisão de planos preventivos, reorganização de equipes, renegociação de peças, modernização tecnológica
DMU-16 (Moinho para Pão)	07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18	Equipamentos intermediários e superiores, com scores entre 0,45 e 0,84	0,55 – 1,00 (com destaque de 0,88 a 1,00)	Ajustes localizados em custos e processos	Replicação imediata de boas práticas: padronização de inspeções, reforço de técnicas preditivas, monitoramento de custos

Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo de eficiência proposto para este estudo adota uma abordagem por Análise Envoltória de Dados (DEA) do tipo input-oriented com retornos constantes à escala (CRS). Esta configuração é particularmente adequada para contextos em que o objetivo é a minimização dos recursos utilizados (inputs), mantendo inalterados os níveis de resultado (outputs) desejados.

A sistemática de medição de eficiência foi estruturada para avaliar, comparar e interpretar o desempenho dos serviços de manutenção e os custos envolvidos a cada

ocorrência mais especificamente na unidade de supermercado da cooperativa. Para tanto, foram definidos os seguintes inputs: o custo-hora da mão de obra técnica, o custo total de peças e o Tempo Médio de Reparo (MTTR) por Ordem de Serviço. Como outputs, foram estabelecidos o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) e a Disponibilidade dos equipamentos.

Através da análise de folgas, o modelo permite a clusterização dos equipamentos em três categorias distintas, conforme seu desempenho relativo: equipamentos críticos, equipamentos intermediários e equipamentos próximos à eficiência. Este resultado analítico fornece aos gestores um embasamento matemático para a tomada de decisões estratégicas, otimizando a alocação de recursos e as intervenções de manutenção.

A validação junto a especialistas reforçou a aderência do modelo proposto às práticas cotidianas da manutenção na Cooperativa. Os gestores confirmaram que as DMUs posicionadas como críticas de fato representam gargalos de custo e confiabilidade, enquanto as referências indicadas pelo DEA coincidem com os equipamentos mais estáveis e produtivos. Esse alinhamento entre análise quantitativa e percepção empírica legitima o uso do modelo como ferramenta de gestão, evidenciando que a integração entre métodos analíticos e conhecimento tácito é fundamental para direcionar estratégias de melhoria.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo propor um modelo para mensuração da eficiência em serviços de manutenção, fundamentado na Análise Envoltória de Dados (DEA) e ajustado à realidade operacional de equipes em campo, bem como aplicar e validar o modelo por meio de um estudo do caso na Cooperativa. Ambos os objetivos foram alcançados. O modelo proposto demonstrou capacidade de diferenciar desempenhos entre os 18 equipamentos avaliados, estabelecendo uma fronteira de eficiência composta pelas DMUs 15 e 16, e fornecendo evidências claras sobre quais ativos demandam intervenções estruturais e quais se encontram próximos da eficiência plena.

A aplicação empírica do modelo DEA gerou contribuições práticas relevantes. O ranking de eficiência permitiu identificar pontos fortes e restrições, enquanto a análise de folgas evidenciou que os principais desafios estão associados a custos de

mão de obra e peças, mais do que à disponibilidade dos equipamentos. A análise de benchmarking revelou a presença de dois perfis de referência distintos, possibilitando estratégias de melhoria diferenciadas: replicação direta das boas práticas em unidades próximas da fronteira e planos estruturais mais complexos para os equipamentos críticos.

Além disso, a etapa de validação com especialistas fortaleceu a confiabilidade dos resultados, pois demonstrou alinhamento entre as evidências quantitativas e a percepção dos gestores. Esse processo iterativo não apenas legitimou o modelo, mas também possibilitou refinamentos metodológicos voltados ao controle de custos e fortalecimento da manutenção preventiva.

Entretanto, algumas limitações devem ser destacadas. A principal refere-se ao fato de que as DMUs analisadas correspondem a equipamentos com funções e complexidades distintas, o que pode introduzir vieses na comparação direta de eficiência. Ainda que a DEA permita certa flexibilidade ao lidar com múltiplos insumos e produtos, a heterogeneidade tecnológica dos ativos exige cautela na generalização dos resultados. Outra limitação relaciona-se ao uso de dados de uma única organização, restringindo a extração para outros contextos sem adaptações.

Em síntese, os resultados confirmam a utilidade do DEA como ferramenta de apoio à gestão da manutenção em ambientes de campo. O modelo proposto oferece subsídios objetivos para a priorização de recursos, orientação de estratégias de melhoria e promoção de práticas de manutenção mais eficientes. Estudos futuros podem ampliar sua aplicação para diferentes setores, incorporar indicadores adicionais (como confiabilidade operacional ou sustentabilidade) e explorar variações metodológicas da DEA, de modo a tornar a análise ainda mais abrangente e precisa.

3.6 REFERENCIAS

AIT BRIK, Abdelkarim; EN-NHAILI, Ahmed; MEDDAOUI, Anwar. Enhancing Operational Performance through Digitalization and Industry 4.0: A Comprehensive Model for Data Reliability and OEE Optimization. **Data and Metadata**, [s. l.], v. 4, p. 475, 2025.

ANTOSZ, Katarzyna. MAINTENANCE - IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF THE COMPETENCY GAP. **EKSPOATACJA I NIEZAWODNOSC-MAINTENANCE AND RELIABILITY**, REDAKCJA KWARTALNIKA EKSPOATACJA & NIEZAWODNOSC, UL NADBYSTRZYCKA 36, LUBLIN, 20-618, POLAND, v. 20, n. 3, p. 484–494, 2018.

- ASKARI, Ali *et al.* Operation and Maintenance (O&M) Risks Management Based on the Hazard and Effect Management Index (HEMI) in an Oilfield. **Journal of Chemical Health Risks**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 157–168, 2025.
- BALOGH, Z *et al.* Reference Architecture for a Collaborative Predictive Platform for Smart Maintenance in Manufacturing. In: , 2018, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA. (A Szakal, Org.)**2018 IEEE 22ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ENGINEERING SYSTEMS (INES 2018)**. 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2018. p. 299–303.
- COELHO, Marilia Botelho *et al.* Project Management Efficiency Measurement with Data Envelopment Analysis: A Case in a Petrochemical Company. **Applied System Innovation**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 2, 2023.
- DASHTAKI, M. Rezaei; JAFARI, A. Jandaghi; HOSEINIE, S. H. Development of a new method for maintainability and downtime analysis of mining machinery. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 4565, 2025.
- DELFIN-ORTEGA, O. Maritime logistics and economic growth in the context of APEC: a two-stage data envelopment analysis study. **Journal of Shipping and Trade**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2025.
- ESFANDYARI, M.; MOGHADDAM, A.H. Comparative analysis of amine-based solvents for energy efficient post-combustion CO₂ capture. **Fuel**, [s. l.], v. 402, 2025.
- FARIAS, Pablo de Carvalho. Mineração 4.0: otimização da manutenção preditiva através da análise de vibração. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. e6690, 2024.
- GONZÁLEZ-DE-JULIÁN, Silvia; VIVAS-CONSUELO, David; BARRACHINA-MARTÍNEZ, Isabel. Modelling efficiency in primary healthcare using the DEA methodology: an empirical analysis in a healthcare district. **BMC Health Services Research**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 982, 2024.
- HADIAN, S.A. *et al.* Evaluating hospital performance with additive DEA and MPI: the Isfahan University of Medical Science case study. **BMC Health Services Research**, [s. l.], v. 25, n. 1, 2025.
- HAIR, Joseph F. Jr *et al.* **Fundamentos de métodos de pesquisa em administração**. Porto Alegre: Bookmann, 2005.
- HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. **Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis**. [S. l.: s. n.], 2020.
- HANSEN, Zaza Nadja Lee *et al.* Complexity management in project organisations. **Production Engineering**, [s. l.], v. 15, n. 3–4, p. 361–370, 2021.
- JIANG, W. *et al.* Impact of pilot public hospital reform on efficiencies: a DEA analysis of county hospitals in East China, 2009–2015. **Health Economics Review**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2025.

- LINA, Li; ZEXUAN, Tan; XIANGZHU, Han. Analysis on AHP-VIKOR-based Supplier Selection for Large Equipment Maintenance of Construction Enterprises. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 49–54, 2022.
- LIU, Yu *et al.* An overview on smart maintenance service scheduling system and theoretical basis for agricultural machinery. In: , 2018, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA. **IEEE 2018 INTERNATIONAL CONGRESS ON CYBERMATICS / 2018 IEEE CONFERENCES ON INTERNET OF THINGS, GREEN COMPUTING AND COMMUNICATIONS, CYBER, PHYSICAL AND SOCIAL COMPUTING, SMART DATA, BLOCKCHAIN, COMPUTER AND INFORMATION TECHNOLOGY**. 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2018. p. 766–771.
- LU, S. *et al.* Distributed maintenance task scheduling for multiple technician teams considering uncertain durations and deterioration effects towards Industry 5.0. **International Journal of Production Research**, [s. l.], 2025.
- LU, W.-M. *et al.* Dynamic performance evaluation of Taiwan's food industry: ESG insights and strategic implications. **Omega United Kingdom**, [s. l.], v. 138, 2026.
- MARCH, Salvatore T.; SCUDDER, Gary D. Predictive maintenance: strategic use of IT in manufacturing organizations. **Information Systems Frontiers**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 327–341, 2019.
- MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 5, n. 7, p. 8913–8923, 2019.
- OLIVEIRA, Ronielton Rezende; MARTINS, Henrique Cordeiro. Estratégia, Pessoas e Operações como agentes influenciadores do desempenho do Escritório de Gerenciamento de Projetos: uma análise por meio da Modelagem de Equações Estruturais. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 410–429, 2018.
- RADMAND, H. *et al.* Efficiency analysis of wheat production in Baghlan Province: a data envelopment analysis (DEA) based approach. **Discover Food**, [s. l.], v. 5, n. 1, 2025.
- SARFARAZ, A.H. *et al.* Assessing repair and maintenance efficiency for water suppliers: a novel hybrid USBM-FIS framework. **Operations Management Research**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 1321–1342, 2023.
- SUN, Xiuxia *et al.* Facilitating Efficiency and Flexibility Ambidexterity in Project-Based Organizations: An Exploratory Study of Organizational Antecedents. **Project Management Journal**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 556–572, 2020.
- TAHER, M *et al.* Correlation between the Management Factors Affecting PMO Implementation in UAE Construction. **International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 155–165, 2021.
- TANG, Yuehao. A Mixed Integer-Linear Programming Model for Solving the Hydroelectric Unit Maintenance Scheduling Problem. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 8, p. 1165–1175, 2025.

VIGLIONI, Tales G.A.; CUNHA, José Adson O.G.; MOURA, Hermano P. A Performance Evaluation Model for Project Management Office Based on a Multicriteria Approach. **Procedia Computer Science**, [s. l.], v. 100, p. 955–962, 2016.

YANG, X.; ZHANG, Y.; WEI, M. A three-stage method for analyzing market concentration and airport efficiency in the Yangtze river Delta. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2025.

ZHU, Ziye; XIN, Youyang; JING, Yi. Analysis on AHP-VIKOR-based Supplier Selection for Large Equipment Maintenance of Construction Enterprises. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 42–48, 2022.

ZULFAKHAR ZUBIR, M. *et al.* Three decades in healthcare service efficiency evaluation: a bootstrapping Data Envelopment Analysis (DEA) of Ministry of Health Malaysia. **Health Economics Review**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2025.

4 DISCUSSÃO, LIÇÕES APRENDIDAS E IMPLICAÇÕES DA PESQUISA

Este capítulo está estruturado em três subseções, a primeira aborda síntese dos achados dos artigos, na segunda sobre as implicações para a prática e lições aprendidas, por fim, na terceira sobre as considerações finais

4.1 SÍNTESE INTEGRADA DOS ACHADOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO DA MENSURAÇÃO DE EFICIÊNCIA

O desenvolvimento desta dissertação esteve ancorado em dois artigos complementares, cada um direcionado a objetivos específicos previamente definidos. O Artigo 1 concentrou-se na identificação de elementos teóricos e práticos sobre a gestão e a eficiência da manutenção, alcançados por meio de uma revisão sistemática de literatura (RSL). O Artigo 2, por sua vez, avançou na proposição, aplicação e validação de um modelo de mensuração da eficiência, fundamentado na Análise Envoltória de Dados (DEA) e aplicado em um estudo de caso no supermercado de uma Cooperativa. A análise conjunta dos dois artigos permite construir uma linha de raciocínio que parte da base conceitual, passa pela proposição metodológica e culmina na aplicação prática, gerando contribuições para o campo da manutenção.

No primeiro artigo, a RSL examinou 17 estudos publicados entre 2007 e 2025. Os trabalhos contemplaram uma diversidade de métodos, como heurísticas baseadas em raciocínio por similaridade, algoritmos de programação matemática e modelos multicritério como AHP e VIKOR. Embora essas investigações tenham apresentado contribuições relevantes, observou-se que o foco predominante estava na análise da eficiência técnica de ativos ou sistemas específicos. Essa ênfase reduziu a atenção para abordagens mais amplas, que considerem a manutenção como atividade organizacional interdependente, envolvendo fatores técnicos, humanos e gerenciais. Assim, a revisão permitiu reconhecer avanços pontuais, mas também destacou que ainda existe espaço para desenvolver modelos que articulem diferentes dimensões da eficiência. A contribuição teórica do artigo, portanto, foi consolidar esse panorama, oferecendo uma base crítica para a formulação de novas abordagens. Do ponto de vista prático, identificou-se a ausência de instrumentos que possam ser aplicados em ambientes de maior complexidade, como cooperativas com rede varejista, em que variáveis logísticas e organizacionais desempenham papel decisivo.

O segundo artigo tratou diretamente dessa lacuna ao propor e testar um modelo de avaliação da eficiência de serviços de manutenção. Utilizando dados de 18 equipamentos do supermercado de uma cooperativa ao longo de 36 meses, o modelo DEA input-oriented com retornos constantes à escala permitiu classificar os ativos em termos de eficiência relativa. Os resultados mostraram que duas DMUs (15 e 16) atingiram a fronteira de eficiência, estabelecendo benchmarks internos para a organização. Em contrapartida, equipamentos como as DMUs 01, 02 e 03 apresentaram múltiplas fragilidades, com custos elevados e baixa confiabilidade, exigindo planos de reestruturação abrangentes. A análise de folgas reforçou que os principais desafios residem na dimensão financeira, especialmente custos de mão de obra e de peças, enquanto a disponibilidade se encontrava em níveis adequados. A etapa de benchmarking revelou ainda a presença de dois perfis de referência distintos, oferecendo estratégias diferenciadas de melhoria. Além disso, a análise de agrupamento hierárquico (Figura 3) complementou os achados ao revelar três clusters distintos: um grupo de baixa eficiência (DMUs 01, 02, 03, 04 e 05), um grupo de referência (DMUs 15 e 16, junto a equipamentos próximos da fronteira - DMUs 11, 17, 14, 15, 12, 18 e 16) e um grupo intermediário (DMUs 06, 07, 08, 09, 10 e 13), permitindo estratégias de melhoria segmentadas.

Ao integrar os dois artigos, percebe-se que a dissertação avança em duas frentes: a primeira, ao consolidar um panorama teórico que evidencia tendências e sinaliza lacunas; a segunda, ao oferecer um modelo validado em campo que fornece instrumentos objetivos para gestores de manutenção. Assim, a combinação de RSL e estudo empírico assegura tanto consistência acadêmica quanto aplicabilidade prática, constituindo um ciclo completo de investigação.

4.2 IMPLICAÇÕES PARA A PRÁTICA E LIÇÕES APRENDIDAS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO

O conjunto dos resultados traz implicações significativas para o mundo real, tanto no contexto específico da Cooperativa quanto em sistemas mais amplos de redes varejistas e organizações que dependem de operações distribuídas. Para os gestores de manutenção, os achados oferecem um instrumento concreto para priorização de recursos. O ranking de eficiência gerado pela DEA não apenas organiza os equipamentos de acordo com seu desempenho relativo, mas também

sinaliza em quais dimensões — custos, tempos de reparo ou confiabilidade — estão localizados os maiores desvios. Essa capacidade de direcionamento é particularmente relevante em ambientes caracterizados por restrições financeiras e operacionais, onde a correta alocação de esforços é determinante para a sustentabilidade.

Para as equipes de manutenção, o estudo contribui ao evidenciar a relação direta entre métricas operacionais e eficiência organizacional. Indicadores como MTTR, MTBF e custos de mão de obra e peças deixam de ser números isolados e passam a compor uma lógica integrada de avaliação, permitindo que os técnicos compreendam como sua atuação impacta o desempenho global. Essa compreensão pode fomentar maior engajamento das equipes, ao evidenciar que melhorias locais — como redução de tempos de reparo ou uso racional de insumos — reverberam em ganhos coletivos de eficiência e competitividade.

No plano organizacional, os resultados reforçam a importância do benchmarking interno. A identificação das DMUs 15 e 16 como referências possibilita que práticas já consolidadas dentro da própria empresa sejam replicadas, reduzindo riscos associados à importação de modelos externos e promovendo aprendizado organizacional contínuo. Além disso, a validação junto a especialistas da Cooperativa demonstrou que a DEA não apenas gera indicadores quantitativos, mas também dialoga com o conhecimento tácito acumulado pelos profissionais de manutenção. Essa integração entre análise analítica e experiência empírica foi uma das principais lições aprendidas, revelando que modelos de eficiência têm maior utilidade quando alinhados à prática cotidiana.

Outro aprendizado foi a heterogeneidade dos ativos analisados. A comparação direta entre equipamentos distintos evidenciou limitações metodológicas, mas também destacou a flexibilidade da DEA em lidar com múltiplas variáveis simultaneamente. Essa experiência indica que, embora a heterogeneidade demande cautela, ela não inviabiliza o uso da técnica, desde que acompanhada de análises qualitativas e validações com especialistas. No caso da Cooperativa, isso permitiu diferenciar ações de curto prazo — como ajustes pontuais em unidades próximas da fronteira — de medidas estruturais de longo prazo, como reestruturação de planos preventivos e renegociação de contratos de peças.

Do ponto de vista acadêmico, a principal contribuição foi demonstrar a viabilidade da DEA em contextos pouco explorados. Ao aplicar o método a serviços

de manutenção externos prestados em campo, a dissertação amplia o escopo de utilização da técnica e abre caminho para pesquisas em setores como saúde, logística e energia, que compartilham a característica de operar de forma descentralizada. Essa ampliação reforça a relevância do trabalho, não apenas como estudo de caso restrito, mas como proposição metodológica replicável.

As lições aprendidas também reforçam a noção de que a eficiência em manutenção é multidimensional. Os resultados mostraram que não basta garantir alta disponibilidade, mas é igualmente necessário equilibrar custos e tempos de reparo. Esse entendimento é crucial para gestores que desejam evitar a armadilha de indicadores parciais que, embora positivos em um aspecto, mascaram ineficiências em outros.

Por fim, cabe destacar que os resultados oferecem implicações para sistemas cooperativos e redes varejistas mais amplamente. Organizações com estruturas descentralizadas, múltiplas unidades e alta diversidade de ativos podem se beneficiar da abordagem proposta, uma vez que a DEA permite comparações internas justas, mesmo em ambientes heterogêneos. Dessa forma, o estudo transcende os limites da Cooperativa e oferece subsídios aplicáveis a outros contextos similares.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA

O percurso desenvolvido nesta dissertação cumpriu integralmente os objetivos propostos. O primeiro artigo atingiu o objetivo específico de identificar elementos teóricos e práticos por meio de uma RSL, oferecendo uma visão abrangente e crítica da literatura sobre eficiência em manutenção. O segundo artigo alcançou os objetivos de propor e aplicar um modelo de mensuração de eficiência, validado empiricamente em uma cooperativa, demonstrando sua utilidade prática e contribuindo para o avanço do conhecimento acadêmico.

Do ponto de vista das contribuições práticas, a dissertação entrega à Cooperativa, e por extensão a organizações similares, uma ferramenta analítica que permite compreender e melhorar a eficiência de seus serviços de manutenção. Do ponto de vista teórico, amplia-se a literatura ao explorar a aplicação da DEA em um contexto pouco estudado, reforçando a relevância de métodos quantitativos na gestão da manutenção.

Entretanto, algumas limitações devem ser reconhecidas. A primeira refere-se à heterogeneidade dos equipamentos analisados, que pode introduzir vieses na comparação direta. Embora a DEA ofereça flexibilidade para múltiplos inputs e outputs, a diversidade tecnológica entre ativos demanda cautela na interpretação dos resultados. A segunda limitação está ligada ao fato de que a pesquisa utilizou dados de uma única organização, o que restringe a generalização dos achados. Ainda, a escolha do modelo DEA CRS, embora adequada ao contexto, não contempla outras formas de retornos de escala, o que pode ser explorado em trabalhos futuros.

Nesse sentido, recomenda-se que pesquisas futuras ampliem o escopo para diferentes setores e empresas, incorporem indicadores adicionais, como sustentabilidade, segurança ou impacto ambiental, e investiguem integrações metodológicas com ferramentas digitais emergentes, como algoritmos de aprendizado de máquina e sistemas preditivos baseados em IoT.

Em síntese, este capítulo encerra a dissertação reforçando que o trabalho conseguiu unir rigor acadêmico e relevância prática, entregando contribuições significativas tanto para a teoria quanto para a prática da manutenção. A trajetória seguida, da revisão sistemática à aplicação empírica, evidenciou a viabilidade de construir modelos integrados, capazes de responder a desafios da gestão da manutenção em ambientes descentralizados. Com isso, a pesquisa se consolida como um passo relevante na direção de sistemas de manutenção mais eficientes, estratégicos e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- AIELLO, G. *et al.* A decision support system to assure high-performance maintenance service. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 651–670, 2021.
- AIT BRIK, Abdelkarim; EN-NHAILI, Ahmed; MEDDAOUI, Anwar. Enhancing Operational Performance through Digitalization and Industry 4.0: A Comprehensive Model for Data Reliability and OEE Optimization. **Data and Metadata**, [s. l.], v. 4, p. 475, 2025.
- ANTOSZ, K. Maintenance - Identification and analysis of the competency gap | Utrzymanie ruchu - Identyfikacja i analiza luki kompetencyjnej. **Eksplotacja i Niezawodnosc**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 484–494, 2018.
- ASKARI, Ali *et al.* Operation and Maintenance (O&M) Risks Management Based on the Hazard and Effect Management Index (HEMI) in an Oilfield. **Journal of Chemical Health Risks**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 157–168, 2025.
- BALOGH, Z *et al.* Reference Architecture for a Collaborative Predictive Platform for Smart Maintenance in Manufacturing. In: , 2018, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA. (A Szakal, Org.) **2018 IEEE 22ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ENGINEERING SYSTEMS (INES 2018)**. 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2018. p. 299–303.
- BRIK, Abdelkarim Ait; EN-NHAILI, Ahmed; MEDDAOUI, Anwar. Enhancing Operational Performance through Digitalization and Industry 4.0: A Comprehensive Model for Data Reliability and OEE Optimization. **Data and Metadata**, [s. l.], v. 4, p. 475, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.56294/dm2025475>.
- CHU, Jianjie; YU, Suihuai; WANG, Wenjun. Research on Computer Aided Aircraft Maintenance Training and Evaluation System Based on User-Centered Design. In: , 2014, LAUBLSRUTISTR 24, CH-8717 STAFA-ZURICH, SWITZERLAND. (G Yang, Org.) **INTELLIGENT MATERIALS AND MECHATRONICS**. LAUBLSRUTISTR 24, CH-8717 STAFA-ZURICH, SWITZERLAND: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2014. p. 328–332.
- COELHO, Marilia Botelho *et al.* Project Management Efficiency Measurement with Data Envelopment Analysis: A Case in a Petrochemical Company. **Applied System Innovation**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 2, 2023.
- DASHTAKI, M. Rezaei; JAFARI, A. Jandaghi; HOSEINIE, S. H. Development of a new method for maintainability and downtime analysis of mining machinery. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 4565, 2025.
- DELFIN-ORTEGA, O. Maritime logistics and economic growth in the context of APEC: a two-stage data envelopment analysis study. **Journal of Shipping and Trade**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2025.

DZIABAS, T.; DEJA, M.; WIŚNIEWSKA, A. A Strategy for Managing the Operation of Technical Infrastructure Based on the Analysis of “Bad Actors”—A Case Study of LOTOS Group S.A. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 8, 2022.

ERMEL, Ana Paula Cardoso. **Literature Grounded Theory: método de pesquisa para investigação sobre o conhecimento científico e tecnológico**. 2021. Dissertação de Mestrado - UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021.

ESFANDYARI, M.; MOGHADDAM, A.H. Comparative analysis of amine-based solvents for energy efficient post-combustion CO₂ capture. **Fuel**, [s. l.], v. 402, 2025.

FARIAS, Pablo de Carvalho. Mineração 4.0: otimização da manutenção preditiva através da análise de vibração. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. e6690, 2024.

GONZÁLEZ-DE-JULIÁN, Silvia; VIVAS-CONSUELO, David; BARRACHINA-MARTÍNEZ, Isabel. Modelling efficiency in primary healthcare using the DEA methodology: an empirical analysis in a healthcare district. **BMC Health Services Research**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 982, 2024.

HADIAN, S.A. *et al.* Evaluating hospital performance with additive DEA and MPI: the Isfahan University of Medical Science case study. **BMC Health Services Research**, [s. l.], v. 25, n. 1, 2025.

HAIR, Joseph F. Jr *et al.* **Fundamentos de métodos de pesquisa em administração**. Porto Alegre: Bookmann, 2005.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. **Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis**. [S. l.: s. n.], 2020.

HANSEN, Zaza Nadja Lee *et al.* Complexity management in project organisations. **Production Engineering**, [s. l.], v. 15, n. 3–4, p. 361–370, 2021.

HSU, Hsin-Wei *et al.* Toward sustainability of Waste-to-Energy: An overview. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 321, p. 119063, 2024.

JIANG, W. *et al.* Impact of pilot public hospital reform on efficiencies: a DEA analysis of county hospitals in East China, 2009–2015. **Health Economics Review**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2025.

LAM, T.Y.M. Procuring professional housing maintenance services. **Facilities**, [s. l.], v. 26, n. 1–2, p. 33–53, 2008.

LESJAK, C. *et al.* Securing smart maintenance services: Hardware-security and TLS for MQTT. In: , 2015. **Proceeding - 2015 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2015**. [S. l.: s. n.], 2015. p. 1243–1250.

LINA, Li; ZEXUAN, Tan; XIANGZHU, Han. Analysis on AHP-VIKOR-based Supplier Selection for Large Equipment Maintenance of Construction Enterprises. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 49–54, 2022.

- LIU, Y. *et al.* An overview on smart maintenance service scheduling system and theoretical basis for agricultural machinery. *In: , 2018. Proceedings - IEEE 2018 International Congress on Cybermatics: 2018 IEEE Conferences on Internet of Things, Green Computing and Communications, Cyber, Physical and Social Computing, Smart Data, Blockchain, Computer and Information Technology, iThings/Gree.* [S. I.: s. n.], 2018. p. 766–771.
- LIU, Ru *et al.* Coordinating contracts for a wind-power equipment supply chain with joint efforts on quality improvement and maintenance services. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, v. 243, 2020.
- LIU, Q. *et al.* Heuristic decision of planned shop visit products based on similar reasoning method: From the perspective of organizational quality-specific immune. **Open Physics**, [s. I.], v. 18, n. 1, p. 126–138, 2020.
- LU, S. *et al.* Distributed maintenance task scheduling for multiple technician teams considering uncertain durations and deterioration effects towards Industry 5.0. **International Journal of Production Research**, [s. I.], 2025
- LU, W.-M. *et al.* Dynamic performance evaluation of Taiwan's food industry: ESG insights and strategic implications. **Omega United Kingdom**, [s. I.], v. 138, 2026.
- MADHIKERMI, Manik *et al.* Data quality assessment of maintenance reporting procedures. **EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 63, p. 145–164, 2016.
- MARCH, Salvatore T.; SCUDDER, Gary D. Predictive maintenance: strategic use of IT in manufacturing organizations. **Information Systems Frontiers**, [s. I.], v. 21, n. 2, p. 327–341, 2019.
- MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, [s. I.], v. 5, n. 7, p. 8913–8923, 2019
- MATUSEVYCH, O O. METHODOLOGY OF DETERMINATION OF QUALITY INDEX OF MAINTENANCE SERVICE SYSTEM OF POWER EQUIPMENT OF TRACTION SUBSTATIONS. **ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS**, VUL FRUNZE 21, KHARKIV, 61002, UKRAINE, n. 1, p. 59–64, 2016.
- MENG, G.; YANLI, J.; XUEMEI, C. Research on E- intelligent maintenance service mechanism and function realization. *In: , 2011. Proceedings - 2011 International Conference on Internet Computing and Information Services, ICICIS 2011.* [S. I.: s. n.], 2011. p. 459–461.
- OLIVEIRA, Ronielton Rezende; MARTINS, Henrique Cordeiro. Estratégia, Pessoas e Operações como agentes influenciadores do desempenho do Escritório de Gerenciamento de Projetos: uma análise por meio da Modelagem de Equações Estruturais. **Gestão & Produção**, [s. I.], v. 25, n. 2, p. 410–429, 2018.

- POLLOCK, Alex; BERGE, Eivind. How to do a systematic review. **International Journal of Stroke**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 138–156, 2018.
- QIN, Y.; NG, K.K.H.; SUN, X. Service accessibility strategy for aircraft maintenance routing with interorganizational collaborations on outsourcing maintenance. **Computers and Industrial Engineering**, [s. l.], v. 190, 2024.
- RADMAND, H. *et al.* Efficiency analysis of wheat production in Baghlan Province: a data envelopment analysis (DEA) based approach. **Discover Food**, [s. l.], v. 5, n. 1, 2025.
- ROBSON, H. *et al.* Delivering improved asset integrity and increased production efficiency through the targeted maintenance of pressure safety valves. In: , 2015. **Society of Petroleum Engineers - SPE Offshore Europe Conference and Exhibition, OE 2015**. [S. l.: s. n.], 2015.
- RÜCKER, K *et al.* **Using Stable Diffusion Model for Text-Driven Generation in Augmented Reality Applications**. [S. l.: s. n.], 2025. v. 1242 LNNS
- SARFARAZ, A.H. *et al.* Assessing repair and maintenance efficiency for water suppliers: a novel hybrid USBM-FIS framework. **Operations Management Research**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 1321–1342, 2023.
- SHAO, Z; KUMRAL, M. Logical analysis of data in predictive failure detection and diagnosis. **International Journal of Quality and Reliability Management**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 401–424, 2025.
- SOTT, Michele Kremer *et al.* Process modeling for smart factories: using science mapping to understand the strategic themes, main challenges and future trends. **Business Process Management Journal**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 1391–1417, 2021.
- SUN, Xiuxia *et al.* Facilitating Efficiency and Flexibility Ambidexterity in Project-Based Organizations: An Exploratory Study of Organizational Antecedents. **Project Management Journal**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 556–572, 2020.
- TAHER, M *et al.* Correlation between the Management Factors Affecting PMO Implementation in UAE Construction. **International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 155–165, 2021.
- TANG, Yuehao. A Mixed Integer-Linear Programming Model for Solving the Hydroelectric Unit Maintenance Scheduling Problem. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 8, p. 1165–1175, 2025.
- TIAN, G. *et al.* Addressing a Collaborative Maintenance Planning Using Multiple Operators by a Multi-Objective Metaheuristic Algorithm. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, [s. l.], v. 22, p. 606–618, 2025.
- TYAGI, A K *et al.* **Artificial Intelligence-Enabled Digital Twin for Smart Manufacturing**. [S. l.]: Wiley, 2024.
- VIGLIONI, Tales G.A.; CUNHA, José Adson O.G.; MOURA, Hermano P. A Performance Evaluation Model for Project Management Office Based on a

Multicriteria Approach. **Procedia Computer Science**, [s. l.], v. 100, p. 955–962, 2016.

WANG, Jingjing; HAN, Honggui. A learning-based memetic algorithm for energy-efficient distributed flow-shop scheduling with preventive maintenance. **Swarm and Evolutionary Computation**, [s. l.], v. 92, p. 101772, 2025.

YANG, X.; ZHANG, Y.; WEI, M. A three-stage method for analyzing market concentration and airport efficiency in the Yangtze river Delta. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2025.

ZHU, Ziye; XIN, Youyang; JING, Yi. Analysis on AHP-VIKOR-based Supplier Selection for Large Equipment Maintenance of Construction Enterprises. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 42–48, 2022.

ZULFAKHAR ZUBIR, M. *et al.* Three decades in healthcare service efficiency evaluation: a bootstrapping Data Envelopment Analysis (DEA) of Ministry of Health Malaysia. **Health Economics Review**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2025.

APÊNDICE A – PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Protocolo de Pesquisa Revisão 00¹	
Questão de Interesse	
Identificar na literatura quais são as aplicações de mensuração de eficiência de equipes de manutenção	
Escopo da Revisão	
Ampla com profundidade	
Estratégia da Revisão	
Configurativa	
Framework Conceitual	
O framework teórico deste estudo será estruturado com base em três eixos centrais identificados na literatura, os quais se mostraram fundamentais para compreender e propor um modelo teórico voltado à gestão da manutenção:	
<p>1. Dimensão Tecnológica: A manutenção industrial tem sido significativamente transformada pelos avanços tecnológicos associados à Indústria 4.0, como inteligência artificial (IA), internet das coisas (IoT), realidade aumentada (RA) e gêmeos digitais. Essas tecnologias possibilitam diagnósticos mais precisos, intervenções preditivas e integração de sistemas em tempo real (Brik; Ennhaili; Meddaoui, 2025; Rücker et al., 2025).</p> <p>2. Dimensão Humana e Organizacional: A eficiência da manutenção depende de fatores humanos, organizacionais e contextuais. Estudos demonstram que as equipes lidam com tarefas de alta variabilidade e diferentes níveis de complexidade, exigindo competências específicas, diagnósticos situacionais e capacidade de adaptação às condições reais de operação (Askari et al., 2025; Farias, 2024).</p> <p>3. Dimensão Analítica e de Tomada de Decisão: A literatura evidencia o uso crescente de métodos quantitativos e heurísticos na avaliação da eficiência em manutenção, como os métodos multicritério AHP e VIKOR (Zhu; Xin; Jing, 2022), o raciocínio baseado em casos (Liu, Ru et al., 2020) e a análise envoltória de dados (DEA) (Sarfaraz et al., 2023). Esses instrumentos</p>	

¹ Desenvolvido no dia 17/03/2025

<p>fortalecem o processo decisório e possibilitam a mensuração comparativa da performance das equipes de manutenção.</p>
Horizonte de Tempo
A partir do ano de 2010
Expressões de Busca
<p>Para a realização da revisão sistemática da literatura, foram definidas expressões de busca com base nos critérios do protocolo PICOC. As palavras-chave utilizadas foram:</p> <p>efficiency, maintenance service, maintenance team, maintenance employee, assessment, evaluation.</p> <p>As expressões foram combinadas da seguinte forma:</p> <p><code>((efficiency) AND ((maintenance service)) OR ("maintenance team")) OR ((maintenance employee*)) AND ("assessment" OR "evaluation"))**</code></p>
Fontes de Busca
<p>Scopus Elsevier</p> <p>Web of Science</p>
Critérios de Inclusão e exclusão
<p>Critérios de inclusão:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Artigos de pesquisa e revisão; • Publicados em periódicos ou conferências; • Sem restrição de tempo ou idioma, desde que abordassem gestão da manutenção. <p>Critérios de exclusão:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Documentos não relacionados ao objetivo de pesquisa (não tratavam de manutenção); • Publicações duplicadas entre as bases; • Trabalhos cujo título ou resumo não evidenciassem relação com avaliação de eficiência em manutenção. <p>As fases finais de triagem foram executadas conforme o protocolo PRISMA, com leitura completa dos textos selecionados</p>
Coleta de Dados

As publicações identificadas na base serão transferidas para o Mendeley, para a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão apresentados anteriormente.

Análise de Dados

Será executada análise bibliométrica e análise de conteúdo

Sínteses dos dados

Os dados serão sintetizados através de Meta-análise e triangulação ecológica

Fonte: Adaptado de (Ermel, 2021)