REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

IMPACTO DO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO (PCM) NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTUDOS PUBLICADOS COM BASE NOS INDICADORES MTBF, MTTR E DISPONIBILIDADE

IMPACT OF MAINTENANCE PLANNING AND CONTROL (MPC) ON OPERATIONAL EFFICIENCY: A COMPARATIVE ANALYSIS OF PUBLISHED STUDIES BASED ON THE MTBF, MTTR AND AVAILABILITY INDICATORS

Engenharias • 14/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/794396951

Edmar Freitas Fernandes[1]

Michaella Socorro Bruce Fialho[2]

RESUMO

A manutenção industrial deixou de representar um suporte meramente operacional para se consolidar como fator estratégico de competitividade organizacional. Nesse cenário, o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) surge como estrutura responsável por transformar dados operacionais em decisões que sustentam a confiabilidade e a disponibilidade dos ativos produtivos. Este artigo tem como objetivo analisar o impacto do PCM sobre a eficiência operacional, tomando como referência três indicadores centrais da gestão da manutenção: o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), o Tempo Médio Para Reparo (MTTR) e a Disponibilidade. A pesquisa foi conduzida por meio de uma análise comparativa de natureza documental, fundamentada em três estudos de caso nacionais publicados na literatura técnico-científica dos últimos anos, envolvendo segmentos industriais distintos: fabricação de equipamentos agrícolas, mineração e logística portuária. Os resultados evidenciam que a estruturação do PCM, associada ao monitoramento sistemático de MTBF, MTTR e Disponibilidade, favorece reduções expressivas no tempo de reparo, ganhos de confiabilidade dos ativos e elevação dos índices de disponibilidade operacional, com reflexos diretos sobre a produtividade e os custos de manutenção. Conclui-se que o PCM, quando orientado por indicadores, tende a transcender a função administrativa e assumir papel estratégico na gestão da eficiência operacional nos contextos analisados.

Palavras-chave: PCM; MTBF; MTTR; Disponibilidade; Eficiência operacional.

ABSTRACT

Industrial maintenance has ceased to be a merely operational support function and has become a strategic factor of organizational

competitiveness. In this context, Maintenance Planning and Control (MPC) emerges as the structure responsible for turning operational data into decisions that sustain the reliability and availability of productive assets. This article aims to analyze the impact of MPC on operational efficiency, based on three core maintenance management indicators: Mean Time Between Failures (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR), and Availability. The research was conducted through a documentary comparative analysis of three national case studies published in the recent technical and scientific literature, covering distinct industrial segments: agricultural equipment manufacturing, mining, and port logistics. The results show that structuring MPC, combined with systematic monitoring of MTBF, MTTR, and Availability, favors significant reductions in repair time, gains in asset reliability, and higher operational availability, with direct effects on productivity and maintenance costs. It is concluded that MPC, when guided by indicators, tends to go beyond the administrative function and assume a strategic role in managing operational efficiency in the contexts analyzed.
Keywords: MPC; MTBF; MTTR; Availability; Operational efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Nos ambientes produtivos contemporâneos, a disponibilidade e a confiabilidade dos ativos deixaram de ser questões restritas ao chão de fábrica para se tornarem variáveis diretamente associadas ao desempenho competitivo das organizações. Paradas não programadas, além de comprometerem metas de produção, geram custos elevados relacionados a mão de obra emergencial, estoque de sobressalentes e perda de faturamento. Diante desse cenário, a manutenção industrial passou por um processo de amadurecimento gerencial, migrando de uma postura

predominantemente reativa para modelos estruturados de planejamento, execução e controle.

O Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) representa o núcleo organizacional responsável por essa transição. Sua função não se limita ao registro de ordens de serviço; cabe ao PCM consolidar informações técnicas, padronizar fluxos de trabalho e, sobretudo, transformar dados brutos de manutenção em indicadores capazes de orientar decisões estratégicas. Entre esses indicadores, três se destacam pela sua capacidade de sintetizar o desempenho da função manutenção: o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), o Tempo Médio Para Reparo (MTTR) e a Disponibilidade, esta última calculada a partir da relação entre os dois primeiros.

Apesar do consenso teórico sobre a relevância desses indicadores, observa-se, em parcela significativa das indústrias, uma lacuna entre o discurso estratégico do PCM e sua aplicação efetiva na rotina de gestão. Em muitos casos, o setor permanece restrito a atividades cartoriais, sem consolidar rotinas de análise crítica dos indicadores levantados, o que limita seu potencial de gerar melhoria contínua. Essa constatação motiva a questão que orienta este artigo: em que medida a estruturação do PCM, evidenciada por meio dos indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade, impacta a eficiência operacional de diferentes segmentos industriais?

Para responder a essa questão, o presente artigo tem como objetivo geral analisar o impacto do PCM sobre a eficiência operacional a partir de uma análise comparativa de estudos de caso publicados na literatura técnico-científica recente. Como objetivos específicos, busca-se: (a) sistematizar os fundamentos conceituais do PCM e dos indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade; (b) analisar

comparativamente resultados reportados em casos publicados envolvendo diferentes segmentos industriais; e (c) discutir os fatores que explicam a relação entre a maturidade do PCM e o desempenho desses indicadores.

A relevância deste trabalho está em oferecer, de forma sintética e comparativa, evidências empíricas já disponíveis na literatura sobre a efetividade do PCM, contribuindo tanto para a formação de profissionais de engenharia quanto para gestores que buscam justificar investimentos em estruturação da manutenção. Do ponto de vista acadêmico, o artigo contribui para consolidar, em um único documento, evidências dispersas em diferentes periódicos e segmentos, favorecendo a construção de um panorama comparativo pouco explorado na literatura nacional sobre o tema. Do ponto de vista prático, os resultados aqui discutidos podem subsidiar gestores de manutenção na justificativa de investimentos em pessoal, sistemas de informação e rotinas de monitoramento de indicadores, uma vez que demonstram, com base em evidências publicadas, a relação entre maturidade do PCM e desempenho operacional.

O artigo está organizado em cinco seções, incluindo esta introdução: a segunda apresenta o referencial teórico sobre PCM e indicadores de manutenção, incluindo suas dimensões estruturais, os principais indicadores de desempenho e sua relação com a Indústria 4.0; a terceira descreve a metodologia adotada, detalhando os critérios de seleção dos casos analisados; a quarta apresenta e discute os resultados, com análise individual e comparativa dos três casos investigados; e a quinta traz as considerações finais, sintetizando as contribuições teóricas e práticas do estudo, bem como suas limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A Manutenção Industrial e o Papel Estratégico do PCM

A gestão da manutenção evoluiu de uma prática essencialmente corretiva para um conjunto de estratégias que combinam ações preventivas, preditivas e corretivas planejadas, com o objetivo de assegurar disponibilidade e confiabilidade dos ativos ao menor custo possível para a organização (Azevedo et al., 2021). Nesse contexto, o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) é descrito como a estrutura responsável por operacionalizar essa estratégia, atuando como elo entre as diferentes áreas envolvidas — manutenção, produção, suprimentos e engenharia — e assegurando que as intervenções técnicas estejam alinhadas aos objetivos corporativos (Beltrame et al., 2024).

Segundo Azevedo et al. (2021), o PCM constitui a base gerencial que possibilita mensurar, analisar e aperfeiçoar continuamente o desempenho da manutenção, sendo o monitoramento de indicadores como custos, MTBF, MTTR e Disponibilidade condição indispensável para o alcance de seus objetivos. Já Beltrame et al. (2024) reforçam que o PCM é a área estratégica responsável por gerenciar parâmetros como estado de conservação dos equipamentos, tempo médio entre falhas e tempo médio para reparo, organizando-se estruturalmente em três frentes complementares: planejamento, programação e controle.

Essa mudança de perspectiva acompanha um movimento mais amplo observado na gestão industrial contemporânea, no qual a manutenção deixa de ser tratada como centro de custo a ser minimizado e passa a ser compreendida como ativo estratégico

capaz de gerar valor. Nesse sentido, indicadores de manutenção não devem ser interpretados isoladamente como métricas técnicas, mas como elementos de um sistema de informação gerencial que conecta o desempenho de cada equipamento aos resultados financeiros e operacionais da organização como um todo (Azevedo et al., 2021). É justamente essa conexão entre dado técnico e decisão gerencial que distingue um PCM maduro de uma estrutura de manutenção meramente reativa.

Nessa mesma direção, Gomes et al. (2022) destacam que estratégias como a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) dependem de uma base gerencial estruturada para que sua efetividade se traduza em ganhos reais de desempenho. A MCC, em particular, concentra-se na preservação da função dos ativos por meio da identificação de modos de falha e da seleção das intervenções mais adequadas a cada tipo de falha, utilizando indicadores como disponibilidade, confiabilidade e segurança do sistema para orientar as decisões de manutenção. Essa abordagem reforça que o PCM não apenas registra o desempenho da manutenção, mas fornece a infraestrutura analítica sobre a qual estratégias mais sofisticadas de gestão de ativos podem ser construídas.

2.2. Estrutura e Funções do Planejamento e Controle da Manutenção

De forma sintética, o planejamento corresponde à definição das ações necessárias para alcançar os resultados desejados; a programação organiza essas ações em um cronograma exequível, considerando recursos humanos, materiais e janelas operacionais disponíveis; e o controle consiste na fiscalização do processo,

identificando desvios e retroalimentando o ciclo de planejamento (Beltrame et al., 2024). Essa lógica cíclica é o que permite ao PCM evoluir de uma função meramente administrativa para uma função analítica, orientada por dados e voltada à melhoria contínua.

O Quadro 1 sintetiza as principais funções associadas a cada uma dessas dimensões, evidenciando como o PCM conecta a operação diária da manutenção aos objetivos estratégicos da organização.

Dimensão	Função central no PCM
Planejamento	Definição de prioridades, elaboração de planos técnicos e alocação de recursos com base em criticidade de ativos.
Programação	Organização temporal das intervenções, alinhando disponibilidade de mão de obra, peças e janelas operacionais.
Controle	Acompanhamento de indicadores (MTBF, MTTR, Disponibilidade), identificação de desvios e retroalimentação do planejamento.
Integração	Conexão entre manutenção, produção, suprimentos e engenharia, sustentando decisões orientadas por dados.

Fonte: *elaborado pelos autores (2026), com base em Azevedo et al. (2021) e Beltrame et al. (2024).*

2.3. Custos de Manutenção e Backlog Como Indicadores Complementares

Além dos indicadores diretamente relacionados à confiabilidade e à disponibilidade dos ativos, a literatura destaca a importância de indicadores de natureza econômica e de capacidade de atendimento como complemento indispensável à leitura do desempenho do PCM. Azevedo et al. (2021) situam os custos de

manutenção entre os indicadores essenciais para a garantia dos objetivos do setor, argumentando que a busca por disponibilidade e confiabilidade deve ocorrer sempre ao menor custo possível para a organização, sob risco de a estratégia de manutenção se tornar financeiramente insustentável, ainda que tecnicamente eficaz.

Nesse contexto, o backlog — entendido como o volume de ordens de serviço pendentes expresso em unidades de tempo de trabalho necessário para sua conclusão — funciona como um indicador de equilíbrio entre a demanda por intervenções de manutenção e a capacidade da equipe responsável por executá-las. Um backlog crescente pode sinalizar dimensionamento insuficiente de recursos, falhas de planejamento ou aumento anormal da frequência de intervenções corretivas, associando-se, direta ou indiretamente, à deterioração do MTBF e à sobrecarga do MTTR. Por essa razão, o acompanhamento conjunto de MTBF, MTTR, Disponibilidade, custos de manutenção e backlog oferece uma leitura mais completa da maturidade do PCM do que a análise isolada de qualquer um desses indicadores.

2.4. Indicadores de Desempenho da Manutenção: MTBF, MTTR e Disponibilidade

O Tempo Médio Entre Falhas (MTBF, do inglês Mean Time Between Failures) mede a confiabilidade de um item reparável, correspondendo à razão entre o somatório dos tempos de operação e o número de falhas ocorridas em um determinado período. Quanto maior o MTBF, maior a confiabilidade do ativo, pois isso indica que o equipamento opera por períodos mais longos entre uma falha e outra (Azevedo et al., 2021; Beltrame et al., 2024).

O Tempo Médio Para Reparo (MTTR, do inglês Mean Time To Repair) expressa a mantenabilidade do sistema, isto é, a facilidade com que a equipe de manutenção consegue restabelecer a função de um equipamento após uma falha. Ele é calculado pela razão entre o somatório dos tempos de reparo e o número de intervenções corretivas realizadas no período analisado. Quanto menor o MTTR, maior a eficiência da execução da manutenção (Beltrame et al., 2024).

A Disponibilidade, por sua vez, sintetiza a relação entre MTBF e MTTR, representando a fração de tempo em que o ativo está apto a desempenhar sua função quando demandado. De modo geral, ela é expressa pela relação entre o MTBF e a soma do MTBF com o MTTR, permitindo comparar, ao longo do tempo, o quanto as ações de planejamento e controle têm favorecido a manutenção da capacidade produtiva instalada (Azevedo et al., 2021). Complementarmente, indicadores como a Eficiência Global dos Equipamentos (OEE) e a Efetividade Total dos Equipamentos (TEEP) incorporam, além da disponibilidade, as dimensões de desempenho e qualidade, oferecendo uma leitura ainda mais abrangente da eficiência operacional (Beltrame et al., 2024). O OEE mede a eficácia do equipamento dentro do tempo de produção programado, enquanto o TEEP amplia essa análise ao considerar o tempo total de calendário, sendo obtido pelo produto entre o OEE e a Utilização — esta última definida pela razão entre o tempo de produção programado e o tempo total de calendário. Por incorporar esse quarto fator, o TEEP é sempre igual ou inferior ao OEE, revelando não apenas a eficiência dentro do turno programado, mas também o potencial de ampliação da programação produtiva.

É importante registrar que a literatura de manutenção emprega, por vezes, diferentes formulações para o conceito de disponibilidade. Este artigo adota como referência central a Disponibilidade Intrínseca (DI), calculada pela razão entre o MTBF e a soma do MTBF com o MTTR, conforme utilizada por Beltrame et al. (2024). Alguns dos estudos comparados, no entanto, recorrem ao conceito de Disponibilidade Física (DF), que considera o tempo total de operação em relação ao tempo total de calendário, incluindo paradas programadas e não programadas (Gomes et al., 2022). Embora conceitualmente próximas — ambas expressam a proporção de tempo em que o ativo está apto a operar —, essas formulações não são numericamente idênticas, razão pela qual, na comparação dos casos apresentada na seção 4, indica-se explicitamente qual conceito de disponibilidade cada estudo utiliza.

Estudos internacionais recentes reforçam a centralidade desses indicadores na gestão de ativos. Żyluk et al. (2023) demonstram, a partir da aplicação de indicadores de tempo médio até a falha no controle logístico de operações, que a padronização e o monitoramento contínuo desses parâmetros são determinantes para o planejamento assertivo das intervenções de manutenção e para a redução de custos logísticos associados à indisponibilidade de equipamentos.

Para fins de sistematização didática, o Quadro 2 reúne as expressões de cálculo e a interpretação gerencial dos principais indicadores discutidos nesta seção, incluindo os indicadores complementares de eficácia global (OEE), efetividade total (TEEP) e backlog, os quais serão retomados na análise dos casos apresentados na seção 4.

Indicador	Expressão de cálculo	Interpretação gerencial

MTBF	Somatório dos tempos de operação dividido pelo número de falhas do período.	Quanto maior, maior a confiabilidade do ativo; orienta a periodicidade das inspeções preventivas.
MTTR	Somatório dos tempos de reparo dividido pelo número de intervenções corretivas do período.	Quanto menor, maior a eficiência da execução da manutenção e da logística de sobressalentes.
Disponibilidade	MTBF dividido pela soma de MTBF e MTTR.	Representa a fração de tempo em que o ativo está apto a operar quando demandado; síntese de MTBF e MTTR.
OEE	Produto entre Disponibilidade, Desempenho e Qualidade, tomando como base o tempo de produção programado.	Mede a eficácia global do equipamento dentro do tempo planejado de produção; valores acima de 85% são considerados de classe mundial.
TEEP	Produto entre o OEE e a Utilização, sendo a Utilização a razão entre o tempo de produção programado e o tempo total de calendário.	Evidencia o aproveitamento do ativo em relação à capacidade máxima teórica (24h/dia), revelando oportunidades de ampliação da programação de produção.
Backlog	Somatório de homens-hora necessários para concluir as ordens de serviço pendentes dividido pelo homem-hora disponível.	Indica o equilíbrio entre demanda de serviços e capacidade da equipe; valores muito altos ou muito baixos sinalizam desajustes no PCM.

Fonte: *elaborado pelos autores (2026), com base em Azevedo et al. (2021) e Beltrame et al. (2024).*

2.5. PCM, Indústria 4.0 e Manutenção Preditiva: Perspectivas Contemporâneas

A digitalização dos processos industriais tem ampliado a capacidade analítica do PCM, na medida em que sensores e sistemas de monitoramento contínuo permitem o cálculo de MTBF, MTTR e Disponibilidade em tempo real, substituindo apurações manuais e retroativas. Rodrigues et al. (2023), ao analisarem a viabilidade de implementação de manutenção preditiva no contexto da Indústria 4.0, destacam que a incorporação de sensoriamento e análise de dados de falha permite antecipar intervenções e reduzir o impacto de modos de falha críticos sobre a disponibilidade dos equipamentos.

Essa perspectiva reforça que o PCM, na era digital, não perde relevância diante das novas tecnologias; ao contrário, ele se torna o elo que traduz os dados coletados por sensores e sistemas de monitoramento em planos de ação, prioridades e cronogramas de intervenção. Sem uma estrutura de planejamento e controle consolidada, o volume de dados gerado por soluções de manutenção preditiva tende a não se converter em ganhos efetivos de disponibilidade e confiabilidade, uma vez que a mera coleta de dados não substitui a análise crítica, a definição de prioridades e a alocação de recursos que caracterizam a função de planejamento e controle.

Sob essa ótica, Żyluk et al. (2023) argumentam que a implementação de indicadores de tempo médio até a falha no apoio logístico de sistemas operacionais depende diretamente da existência de processos formalizados de controle, capazes de transformar o dado coletado em decisão de suprimento de peças, alocação de mão de obra e priorização de intervenções. Esse argumento reforça a tese central deste artigo: a tecnologia amplia a capacidade de observação do PCM, mas é a maturidade da gestão

que determina a conversão dessa observação em eficiência operacional efetiva.

2.6. Maturidade do PCM Como Fator Explicativo do Desempenho Operacional

A literatura analisada sugere que a relação entre PCM e eficiência operacional não é linear nem automática, mas mediada pelo grau de maturidade da gestão da manutenção. Organizações em estágios iniciais de maturidade tendem a restringir o PCM ao registro de ordens de serviço, sem consolidar rotinas de análise crítica de indicadores; à medida que a maturidade avança, o PCM passa a incorporar reuniões multidisciplinares de análise de causas, planos de ação estruturados e metas formais de disponibilidade, como evidenciado no caso do terminal portuário discutido por Beltrame et al. (2024), em que a definição de uma meta anual de Disponibilidade Intrínseca, baseada em estudo estatístico do exercício anterior, exemplifica um estágio avançado de gestão orientada por dados.

Esse conceito de maturidade permite compreender por que segmentos industriais tão distintos — como a fabricação de equipamentos agrícolas, a mineração e a logística portuária — podem apresentar padrões semelhantes de melhoria quando adotam rotinas equivalentes de planejamento, programação e controle. Em outras palavras, não é o setor de atuação que determina isoladamente o desempenho da manutenção, mas também o grau de estruturação do PCM e sua capacidade de transformar dados de MTBF, MTTR e Disponibilidade em decisões efetivas de gestão — hipótese que, dado o número reduzido de

casos analisados, carece de confirmação em pesquisas com amostras mais amplas.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa possui natureza aplicada e abordagem qualitativa, com apoio de dados quantitativos secundários, caracterizando-se como uma análise comparativa de tipo documental. Optou-se por essa estratégia metodológica em razão da possibilidade de reunir, de forma sistematizada, evidências empíricas já produzidas e publicadas sobre a relação entre PCM e os indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade em diferentes contextos industriais, sem a necessidade de coleta de dados primários em campo, o que seria inviável dentro do escopo e do prazo deste artigo. É importante destacar que este trabalho não constitui, em si, um estudo de caso: os três materiais analisados são estudos de caso conduzidos por seus respectivos autores em organizações específicas, e o presente artigo realiza uma análise comparativa de segunda ordem sobre esses resultados já publicados.

A busca dos estudos foi realizada entre julho e setembro de 2026, utilizando o Google Acadêmico, o Portal de Periódicos da CAPES, o SciELO e repositórios institucionais de universidades brasileiras (como o repositório da USP), além de bases de periódicos de acesso aberto (como a Revista Interface Tecnológica, a Revista Espaço Acadêmico e a Research, Society and Development). As buscas combinaram os termos "PCM" ou "Planejamento e Controle da Manutenção" com os termos "MTBF", "MTTR", "Disponibilidade", "indicadores de manutenção" e "estudo de caso", unidos pelo operador booleano AND, com filtro de data restrito a publicações entre 2020 e 2026. Os títulos e resumos dos resultados retornados

foram triados manualmente, priorizando-se estudos que relatassem valores quantitativos de MTBF, MTTR e/ou Disponibilidade associados a alguma forma de intervenção de PCM, e que fossem oriundos de segmentos industriais distintos entre si, de modo a permitir uma comparação mais rica.

A seleção dos casos analisados seguiu três critérios adicionais: (a) publicação em periódicos ou anais científicos nos últimos seis anos, de modo a assegurar atualidade metodológica e tecnológica; (b) utilização explícita dos indicadores MTBF, MTTR e/ou Disponibilidade como elementos centrais de análise, associados à atuação do setor de PCM; e (c) disponibilização de resultados quantificáveis que permitissem comparação entre os casos. A partir desses critérios, foram selecionados três estudos de caso nacionais publicados em segmentos industriais distintos: (1) uma indústria de equipamentos agrícolas, analisada por Cardoso e Regattieri (2020); (2) uma empresa de mineração, que comparou o desempenho de caminhões fora de estrada novos e reformados, estudada por Gomes et al. (2022); e (3) um terminal portuário de logística integrada, investigado por Beltrame et al. (2024). Os três estudos foram publicados em veículos brasileiros — a Revista Interface Tecnológica, a Research, Society and Development e a Revista Espaço Acadêmico, respectivamente —, o que caracteriza a amostra de casos analisada como de origem nacional; a literatura internacional foi utilizada neste artigo apenas como suporte teórico complementar, notadamente por meio de Żyluk et al. (2023), e não compõe o conjunto de casos comparados.

O Quadro 3 detalha o protocolo de seleção adotado, explicitando os critérios utilizados e a justificativa metodológica de cada um deles,

de modo a assegurar a replicabilidade do processo por outros pesquisadores interessados em ampliar a base de casos analisados.

Critério	Descrição	Justificativa
Atualidade	Publicações entre 2020 e 2026, em periódicos, anais de eventos científicos ou trabalhos de conclusão de curso institucionalmente vinculados.	Garantir aderência a práticas e tecnologias de gestão da manutenção vigentes.
Centralidade dos indicadores	Uso explícito de MTBF, MTTR e/ou Disponibilidade como variáveis de análise associadas à atuação do PCM.	Assegurar comparabilidade direta com o objeto deste artigo.
Quantificação de resultados	Disponibilização de valores numéricos, percentuais ou variações mensuráveis dos indicadores analisados.	Possibilitar análise comparativa objetiva entre os casos.
Diversidade setorial	Priorização de casos oriundos de segmentos industriais distintos entre si.	Testar a transversalidade da contribuição do PCM para além de um único setor.

Fonte: *elaborado pelos autores (2026).*

O procedimento de análise consistiu na leitura integral dos três estudos, extração dos dados relativos aos indicadores MTBF, MTTR, Disponibilidade e, quando disponíveis, OEE, TEEP e backlog, seguida de categorização temática e comparação qualitativa dos resultados à luz do referencial teórico apresentado na seção anterior. Para cada caso, foram registrados: (a) o segmento industrial e o contexto organizacional descrito pelos autores; (b) o período de apuração dos indicadores; (c) os valores numéricos ou variações percentuais reportados; (d) o conceito específico de disponibilidade empregado

(Intrínseca ou Física); e (e) as explicações causais apresentadas pelos próprios autores para os resultados observados. A análise buscou identificar padrões comuns entre os casos — independentemente do segmento industrial — que evidenciassem a contribuição do PCM para a eficiência operacional, bem como eventuais divergências que pudessem ser explicadas por diferenças de contexto ou de maturidade organizacional.

Cabe destacar que a natureza comparativa deste estudo não tem pretensão de generalização estatística, mas sim de generalização analítica, na medida em que busca identificar padrões teoricamente relevantes que possam ser testados e aprofundados em pesquisas futuras de natureza primária. Essa opção metodológica é coerente com a tradição de estudos de caso em Engenharia de Produção e Gestão da Manutenção, área em que a comparação entre casos publicados constitui estratégia reconhecida para consolidação de conhecimento aplicado antes da formulação de hipóteses a serem testadas em amostras maiores.

Como limitação metodológica, reconhece-se que a utilização de dados secundários impede o controle direto sobre variáveis contextuais de cada organização estudada, bem como a padronização integral dos períodos de apuração e das metodologias de cálculo empregadas em cada caso original — inclusive quanto ao próprio conceito de disponibilidade adotado, como discutido na seção 2.4. Ainda assim, a triangulação entre três estudos de segmentos distintos permite identificar convergências que merecem investigação adicional, cumprindo o propósito exploratório e comparativo a que este artigo se propõe.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caso 1 — Indústria de Equipamentos Agrícolas

No estudo conduzido por Cardoso e Regattieri (2020) em uma fabricante de equipamentos agrícolas no interior de São Paulo, a implantação de um processo estruturado de monitoramento de indicadores, com reuniões periódicas entre manutenção e operação, permitiu à equipe de PCM identificar as principais causas de indisponibilidade de um centro de usinagem crítico (modelo 028001) para o processo produtivo. Como resultado direto desse acompanhamento, os autores registram um ganho de 78,47 horas de disponibilidade da máquina para a área produtiva, que passou de 111,18 horas em abril para 189,65 horas em junho.

Quanto ao MTTR, os autores relatam uma redução de 8,02 horas em abril para 0 hora em junho. É importante interpretar esse resultado com precisão: o valor de zero não indica que os reparos passaram a ser instantâneos, mas sim que, no mês de junho, não ocorreu nenhuma intervenção corretiva na máquina — ou seja, o numerador (tempo total de reparo) e o número de falhas do período foram ambos nulos, o que os próprios autores descrevem como um "período sem falhas na máquina" (Cardoso; Regattieri, 2020). Trata-se, portanto, de um reflexo indireto da melhoria do MTBF (ausência de quebras) e não de um ganho autônomo na velocidade de execução dos reparos.

Esse resultado ilustra um princípio central do PCM: a disponibilidade não decorre de um único evento isolado, mas da consolidação de rotinas de monitoramento, discussão multidisciplinar dos dados e definição de planos de ação, elementos que caracterizam o ciclo de planejamento, programação e controle descrito na seção 2.2. Cabe registrar que este caso utiliza o conceito de disponibilidade em

horas absolutas dedicadas à produção, sem explicitar uma fórmula percentual de Disponibilidade Intrínseca ou Física, o que limita parcialmente sua comparabilidade direta com os demais casos analisados.

4.2. Caso 2 — Mineração: Caminhões Fora de Estrada Novos e Reformados

Gomes et al. (2022) realizaram um estudo comparativo entre o desempenho de caminhões fora de estrada novos e reformados em uma empresa de mineração de grande porte, utilizando como indicadores o MTBF, o MTTR e a Disponibilidade Física (DF) — esta última calculada com base no tempo total de operação em relação ao tempo total de calendário, incluindo todas as paradas corretivas e preventivas. Foram acompanhados seis caminhões reformados e seis caminhões novos ao longo das primeiras 1.000 horas de operação de cada equipamento, com dados extraídos de planilhas de ocorrência e registros históricos de manutenção.

Os resultados mostram que a frota nova apresentou, em média, MTBF 143% superior ao da frota reformada e MTTR 23% inferior. Em termos de Disponibilidade Física, os caminhões novos alcançaram valores entre 87,11% e 96,39%, enquanto os reformados variaram entre 74,54% e 91,50%. Essa diferença esteve associada a uma incidência bem maior de manutenções corretivas na frota reformada: 288 intervenções, totalizando 1.401 horas de reparo, contra 127 intervenções e 599,33 horas na frota nova (variação de 127% no número de corretivas e de 134% no tempo total dedicado a elas).

O aspecto mais relevante para este artigo, contudo, está na resposta gerencial ao desempenho inicial insatisfatório dos equipamentos reformados: a empresa contratante e a revendedora responsável pela reforma estruturaram um plano de ação de PCM com duração de 1.000 horas, alocando uma equipe dedicada — um técnico para inspeções diárias e geração de backlog de anomalias, e cinco técnicos para manutenções preventivas programadas semanalmente e corretivas prioritárias. Com essa estruturação, a série temporal dos indicadores mostrou tendência clara de melhoria: o MTBF cresceu de forma acentuada nos períodos finais de acompanhamento, e o MTTR, que nos três primeiros períodos ficou fora da meta estabelecida pelo cliente, atingiu a meta apenas no último período analisado. Como consequência, a Disponibilidade Física média da frota reformada evoluiu de um patamar inicial abaixo da meta para 88,04% após 2.000 horas de operação — quando somente a equipe de manutenção do cliente atuava, os resultados eram consideravelmente mais baixos, e a melhora coincidiu com a entrada da equipe estruturada de acompanhamento (Gomes et al., 2022).

Esse caso evidencia que, mesmo em cenários nos quais os indicadores absolutos permanecem abaixo dos de equipamentos comparáveis mais novos, a implantação de rotinas de PCM — inspeção sistemática, geração de backlog e manutenção preventiva programada — produz uma trajetória mensurável de melhoria em MTBF, MTTR e Disponibilidade ao longo do tempo, corroborando a relação discutida na seção 2.6 entre maturidade do PCM e desempenho operacional.

4.3. Caso 3 — Terminal Portuário de Logística Integrada

O terceiro caso, reportado por Beltrame et al. (2024), refere-se a uma unidade portuária responsável pelo embarque de grãos, na qual o setor de Confiabilidade apurava mensalmente os indicadores de Disponibilidade Intrínseca (DI), MTBF e MTTR, além dos indicadores complementares OEE e TEEP. No início do período analisado, a área de Engenharia da empresa havia definido uma meta de disponibilidade de 90,71% para o ano em curso, a partir de estudo estatístico dos resultados do exercício anterior.

Os dados apresentados pelos autores mostram que, nos meses em que o MTTR se manteve baixo e o MTBF elevado, a meta de disponibilidade foi atingida; já nos meses em que ocorreram falhas críticas — com maior tempo de reparo — ou aumento na frequência de quebras — com redução do MTBF —, o indicador de disponibilidade ficou aquém do esperado. No acumulado do período, a Disponibilidade Intrínseca ficou 4,97% abaixo da meta estabelecida. Ainda assim, o indicador OEE consolidado foi classificado como “muito bom”, por superar o patamar de 85% considerado de classe mundial, enquanto o TEEP indicou um aproveitamento médio de 87,77% da capacidade produtiva instalada, sinalizando espaço para ganhos adicionais de efetividade.

Esse caso é particularmente relevante por evidenciar a relação direta e mensurável entre MTBF, MTTR e Disponibilidade: nos meses em que o comportamento de um dos dois primeiros indicadores se deteriorava, o reflexo sobre a disponibilidade operacional era imediato, confirmando empiricamente a relação teórica discutida na seção 2.4. Ressalta-se que este caso adota o conceito de Disponibilidade Intrínseca (DI), calculado pela razão MTBF/(MTBF+MTTR), o mesmo conceito tomado como referência central neste artigo.

4.4. Análise Comparativa Entre os Casos

O Quadro 4 sintetiza os principais elementos comparativos entre os três casos analisados, permitindo identificar padrões comuns apesar da diversidade de segmentos industriais representados.

Caso	Segmento	Indicadores centrais	Principal resultado reportado
1 — Cardoso e Regattieri (2020)	Fabricação de equipamentos agrícolas	Disponibilidade (horas) e MTTR	Elevação da disponibilidade de um centro de usinagem crítico, com aumento de 78,47 horas disponíveis à produção (111,18h para 189,65h) e MTTR reduzido a zero em junho, refletindo um mês sem falhas registradas.
2 — Gomes et al. (2022)	Mineração (caminhões fora de estrada)	MTBF, MTTR e Disponibilidade Física (DF)	Frota reformada com desempenho inicialmente inferior à frota nova (na frota nova, MTBF 143% superior e MTTR 23% inferior), porém com trajetória de melhoria via PCM estruturado, elevando a DF a 88,04% após 2.000 horas de operação.
3 — Beltrame et al. (2024)	Terminal portuário de logística integrada	DI, MTBF, MTTR, OEE e TEEP	Disponibilidade Intrínseca acumulada 4,97% abaixo da meta de 90,71%; OEE classificado como “muito bom” (> 85%); aproveitamento médio da capacidade produtiva (TEEP) de 87,77%.

Fonte: *elaborado pelos autores (2026), com base em Cardoso e Regattieri (2020), Gomes et al. (2022) e Beltrame et al. (2024).*

A leitura comparativa dos três casos permite algumas constatações, com as devidas ressalvas quanto às diferenças metodológicas entre eles. Em primeiro lugar, independentemente do setor de atuação — fabricação de equipamentos agrícolas, mineração ou logística portuária —, o desempenho da manutenção mostrou-se associado à existência de rotinas estruturadas de monitoramento dos indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade, o que é consistente com a literatura que descreve o PCM como núcleo organizacional da gestão da manutenção (Beltrame et al., 2024; Azevedo et al., 2021).

Em segundo lugar, observa-se que os ganhos de disponibilidade não decorrem de ações isoladas sobre um único indicador, mas da atuação combinada sobre MTBF e MTTR: reduzir o tempo de reparo sem atuar sobre a frequência de falhas, ou vice-versa, tende a gerar resultados limitados, como evidenciado no caso do terminal portuário, em que a manutenção de um bom índice de MTTR não foi suficiente, isoladamente, para sustentar a meta de disponibilidade diante do aumento da quebra de equipamentos.

Em terceiro lugar, o caso da mineradora mostra que a implantação de rotinas de PCM pode produzir melhoria mensurável nos indicadores mesmo quando o ponto de partida é desfavorável, reforçando que a maturidade da gestão da manutenção é fator explicativo tão ou mais relevante do que as condições iniciais dos ativos. Esse achado é compatível com a perspectiva de que a manutenção preditiva e as tecnologias associadas à Indústria 4.0 potencializam — mas não substituem — a função de planejamento e controle, uma vez que os dados gerados por sensores e sistemas

digitais dependem de um processo estruturado de análise para se converterem em decisões eficazes (Rodrigues et al., 2023).

Por fim, a convergência de resultados entre segmentos tão distintos sugere que o binômio MTBF-MTTR, sintetizado na Disponibilidade, funciona como uma espécie de "termômetro" da maturidade do PCM: organizações que monitoram e discutem esses indicadores de forma sistemática tendem a apresentar desempenho operacional mais estável e previsível, mesmo diante de variações na demanda produtiva.

4.5. Implicações Gerenciais

Os achados discutidos até aqui permitem derivar implicações práticas para gestores de manutenção e de operações. Primeiramente, a experiência do caso 1 sugere que reuniões periódicas e multidisciplinares de análise de indicadores — envolvendo manutenção, produção e, quando pertinente, engenharia — constituem prática de baixo custo e alto impacto sobre a disponibilidade de ativos críticos, por permitirem a rápida identificação de causas de falha e a pactuação de planos de ação entre as áreas envolvidas (Cardoso; Regattieri, 2020).

Em segundo lugar, o caso da mineradora evidencia que a estruturação de uma equipe dedicada de PCM — com atribuições claras entre inspeção diária, geração de backlog e execução de preventivas programadas — é capaz de reverter uma trajetória inicial desfavorável de MTBF, MTTR e Disponibilidade em um horizonte de tempo relativamente curto (Gomes et al., 2022). Isso sugere que investimentos em dimensionamento de equipe e clareza de papéis

dentro do PCM podem ser tão relevantes quanto a idade ou o estado de conservação dos próprios ativos.

Em terceiro lugar, o caso 3 demonstra a importância de se estabelecerem metas formais de disponibilidade, fundamentadas em análise estatística de desempenho histórico, como referência para a avaliação periódica dos resultados (Beltrame et al., 2024). A definição de metas não apenas orienta a atuação da equipe de manutenção, mas também possibilita a identificação objetiva de períodos críticos — como aqueles marcados por falhas de maior severidade — nos quais se concentram as maiores oportunidades de melhoria.

Cabe registrar ainda que, embora não tenha sido incluído entre os três casos comparados por não apresentar quantificação de MTBF e MTTR no mesmo nível de detalhamento dos demais, o estudo de Vitonto e Regattieri (2021) oferece evidência complementar relevante: os autores associam a ausência de um PCM consistente ao agravamento de falhas em ativos essenciais e relacionam a adoção de práticas mais específicas de gestão da manutenção a ganhos de produtividade e à redução de custos com intervenções não planejadas, reforçando — em caráter qualitativo — que os efeitos do PCM tendem a extrapolar o ambiente técnico da manutenção.

Por fim, a discussão da seção 2.5 sugere que investimentos em sensoriamento e manutenção preditiva devem ser acompanhados de igual investimento na capacidade analítica do PCM, sob risco de gerar volumes crescentes de dados sem correspondente ganho de disponibilidade ou confiabilidade. Nesse sentido, a maturidade do

PCM deve ser tratada como pré-requisito, e não como consequência automática, da adoção de tecnologias associadas à Indústria 4.0.

4.6. Síntese Conceitual: Da Estruturação do PCM à Eficiência Operacional

A análise conjunta dos três casos permite propor uma síntese conceitual da cadeia de relações discutida ao longo deste artigo, articulando os elementos apresentados no referencial teórico e evidenciados empiricamente na seção de resultados. Essa cadeia pode ser descrita em quatro elos sucessivos: (i) a estruturação do PCM, por meio de rotinas de planejamento, programação e controle, viabiliza a coleta sistemática e confiável de dados de falha e reparo; (ii) esses dados alimentam o cálculo de MTBF e MTTR, que funcionam como indicadores primários de confiabilidade e mantenabilidade; (iii) a combinação desses dois indicadores determina a Disponibilidade operacional dos ativos, complementada por indicadores de eficácia global como OEE e TEEP; e (iv) a manutenção sustentada de níveis adequados de disponibilidade se converte em ganhos de produtividade, redução de custos e maior competitividade organizacional.

Essa cadeia não deve ser interpretada como um fluxo unidirecional e automático, mas como um ciclo retroalimentado: os resultados observados em MTBF, MTTR e Disponibilidade devem, por sua vez, reorientar o planejamento e a programação futura do PCM, fechando o ciclo de melhoria contínua já discutido na seção 2.2. É precisamente essa retroalimentação — presente, em maior ou menor grau, nos três casos analisados — que distingue organizações com PCM maduro daquelas em que a manutenção permanece

restrita a uma função reativa e desconectada da estratégia organizacional.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como objetivo analisar o impacto do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) sobre a eficiência operacional, a partir dos indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade, mediante a análise comparativa de três estudos de caso publicados em segmentos industriais distintos. Os resultados obtidos permitem afirmar que o objetivo foi atingido: em todos os casos analisados, a estruturação de rotinas de PCM — compreendendo planejamento, programação e controle — mostrou-se associada a ganhos de disponibilidade operacional, redução do tempo médio de reparo e aumento da confiabilidade dos ativos, com reflexos sobre produtividade e custos.

A pesquisa não partiu de uma hipótese formal a ser confirmada ou refutada, mas de uma questão-problema que orientou a análise comparativa realizada. À luz dos três casos examinados, observa-se que o PCM, quando efetivamente orientado por indicadores, tende a extrapolar a função cartorial de registro de ordens de serviço e a assumir papel mais estratégico na gestão da eficiência operacional. Essa constatação foi observada de forma consistente nos três segmentos analisados — fabricação de equipamentos agrícolas, mineração e logística portuária —, o que sugere, sem permitir generalização estatística, que os princípios de planejamento, programação e controle podem ser aplicáveis a diferentes realidades industriais, desde que adaptados às especificidades de cada contexto. Estudos adicionais, com amostras maiores e de outros

segmentos, são necessários para verificar até que ponto esse padrão se sustenta.

Do ponto de vista teórico, este artigo contribui ao propor uma síntese conceitual que articula, de forma explícita, a cadeia de relações entre estruturação do PCM, indicadores primários de confiabilidade e mantenabilidade (MTBF e MTTR), indicadores sintéticos de disponibilidade e eficácia global (Disponibilidade, OEE e TEEP) e resultados organizacionais de produtividade e custo, apresentada na seção 4.6. Essa síntese pode servir de referência para estudos futuros que busquem testar empiricamente, em uma única organização e ao longo de períodos mais extensos, a força e a direção causal dessas relações.

Do ponto de vista prático, os resultados reforçam, com base em evidências publicadas e não em recomendações genéricas, a importância de gestores investirem na maturidade do PCM antes ou paralelamente à adoção de tecnologias de manutenção preditiva, bem como a relevância de traduzir indicadores técnicos em argumentos gerenciais capazes de sensibilizar a alta administração para a relação entre disponibilidade de ativos e desempenho corporativo, conforme discutido na seção 4.5.

Como limitação deste estudo, destaca-se o uso exclusivo de dados secundários, o que impede o controle direto sobre variáveis contextuais e a padronização das metodologias de cálculo entre os casos analisados — inclusive quanto ao próprio conceito de disponibilidade adotado por cada fonte. Destaca-se, ainda, que as conclusões aqui apresentadas se restringem aos três segmentos efetivamente estudados (equipamentos agrícolas, mineração e logística portuária), não devendo ser estendidas a outros setores

sem verificação específica. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a condução de estudos de caso primários, com coleta direta de dados de manutenção em uma única organização ao longo de períodos mais extensos, de modo a aprofundar a análise causal entre a maturidade do PCM e o comportamento de MTBF, MTTR e Disponibilidade, bem como investigar o papel de tecnologias de manutenção preditiva na ampliação desses ganhos.

Por fim, espera-se que este artigo contribua tanto para a formação de profissionais de Engenharia Mecânica e áreas correlatas quanto para gestores de manutenção interessados em fundamentar, com evidências da literatura recente, investimentos na estruturação do PCM como instrumento de melhoria contínua da eficiência operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, Thiago Calabrese et al. Engenharia de manutenção: uma revisão de indicadores de manutenção e suas inter-relações. In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA (SIPGEM), 2021, São Carlos. **Anais [...].** São Carlos: EESC-USP, 2021. Disponível em: http://soac.eesc.usp.br/index.php/SiPGEM/vsipgem/paper/view/3175/2072. Acesso em: 1 set. 2026.

BELTRAME, Júlia Oliveira; GUZZO, Marcus Vinicius Pires; SILVA, Raiane Borlini; MARTINS, Débora de Souza; CONCEIÇÃO, Diego Santana. Análise da eficiência da manutenção através de indicadores chave de desempenho. **Revista Espaço Acadêmico,** v. 14, n. 1, 2024. ISSN 2178-3829. Disponível em: https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2024/09/ANALISE-DA-

EFICIENCIA-DA-MANUTENCAO-ATRAVES-DE-INDICADORES-CHAVE-DE-DESEMPENHO.pdf. Acesso em: 1 set. 2026.

CARDOSO, Eduardo Vinicius; REGATTIERI, Carlos Roberto. Indicadores de manutenção industrial: um estudo de caso da gestão estratégica impactando nos resultados corporativos do ramo de equipamentos agrícolas. **Revista Interface Tecnológica,** Taquaritinga, v. 17, n. 1, p. 603-612, 2020. DOI: https://doi.org/10.31510/infa.v17i1.761. Disponível em: https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/761. Acesso em: 1 set. 2026.

GOMES, Bruno Trindade; BARBOSA, Leandro César Mol; PEREIRA, Natália; REAL, Luiza Bernardes. Reforma como estratégia de manutenção: um estudo de caso comparativo entre o desempenho de caminhões fora de estrada novos e reformados em uma empresa de mineração. **Research, Society and Development,** v. 11, n. 8, e36011830854, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30854.

RODRIGUES, Ana Luiza Vieira; GOMES, Guilherme; BOUZON, Marina; FRAZZON, Enzo Morosini. Estudo de viabilidade para implementação de manutenção preditiva no contexto da indústria 4.0. **Brazilian Journal of Development,** Curitiba, v. 9, n. 8, p. 23133-23154, 2023. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv9n8-002.

VITONTO, Alan William; REGATTIERI, Carlos Roberto. Planejamento e controle da manutenção para aumento na produtividade e redução de custos. **Revista Interface Tecnológica,** Taquaritinga, v. 18, n. 1, p. 546-554, 2021. DOI: https://doi.org/10.31510/infa.v18i1.1123. Disponível em:

https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1123. Acesso em: 1 set. 2026.

ŻYLUK, Andrzej; ZIEJA, Mariusz; GRZESIK, Norbert; TOMASZEWSKA, Justyna; KOZŁOWSKI, Grzegorz; JASZTAL, Mariusz. Implementation of the mean time to failure indicator in the control of the logistical support of the operation process. **Applied Sciences,** v. 13, n. 7, p. 4608, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/app13074608.

---

[1] Discente do Curso Superior de Engenharia Mecânica da Faculdade Fucapi – Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Docente do Curso Superior de Engenharia Mecânica da Faculdade Fucapi – Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail