

# Gestão Estratégica da Manutenção Elétrica Industrial: Modelos de Planejamento, Controle e Confiabilidade Aplicados à Indústria de Bebidas

Fernando Berto Higino Silva

Centro De Estudos Superiores De Maceió - CESMAC

Engenheiro Elétrico

CREA: 0215617150

## Resumo

A gestão da manutenção elétrica industrial desempenha papel estratégico na garantia da disponibilidade operacional, segurança energética e redução de custos em ambientes produtivos de alta complexidade, como a indústria de bebidas. Este artigo apresenta uma análise aprofundada dos métodos de planejamento e controle da manutenção elétrica com base na experiência aplicada em unidades fabris da Coca-Cola. São discutidos os principais indicadores de desempenho (KPIs) utilizados na gestão de ativos elétricos, além da aplicação integrada de metodologias como PCM (Planejamento e Controle da Manutenção), RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade), manutenção preditiva com base em sensores inteligentes e softwares de GMAO (Gestão de Manutenção Assistida por Computador). A pesquisa incorpora estudos de caso e métricas reais de confiabilidade, como MTBF, MTTR e taxa de disponibilidade, demonstrando o impacto positivo da manutenção estratégica na performance global da planta industrial. Conclui-se que, ao alinhar tecnologia, engenharia de manutenção e gestão integrada de dados, é possível elevar o desempenho energético, antecipar falhas críticas e otimizar recursos operacionais em escala industrial. O artigo contribui para o avanço da engenharia de manutenção como campo interdisciplinar fundamental na transição para a Indústria 4.0.

**Palavras-chave:** Gestão de Manutenção Elétrica; Planejamento e Controle da Manutenção (PCM); Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM); Indústria 4.0.

Date of Submission: 16-07-2025

Date of Acceptance: 26-07-2025

## I. Introdução

A crescente complexidade dos processos industriais tem exigido que as plantas fabris adotem estratégias cada vez mais robustas para garantir a continuidade operacional e a competitividade no mercado global. Na indústria de bebidas, em particular, a manutenção elétrica industrial assume papel estratégico, visto que falhas em sistemas de fornecimento e distribuição de energia podem resultar em paradas de linha de envase capazes de gerar perdas financeiras significativas e comprometer prazos de entrega. Estudos de Padilha (2018) demonstram que cada hora de parada em linhas de engarrafamento contínuo pode representar um decréscimo de até 0,5 % na receita anual de uma planta de porte médio, realçando a importância da manutenção elétrica como elemento-chave na sustentação de operações críticas.

Historicamente, o paradigma reativo de manutenção dominava o cenário industrial, limitando-se ao reparo emergencial após a ocorrência de falhas. Essa abordagem não apenas elevava os custos operacionais como aumentava o risco de danos colaterais a equipamentos adjacentes e à segurança dos trabalhadores. A partir da década de 1990, pesquisadores como Moubrey (1997) introduziram a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM), framework que prioriza a análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA) para definir rotinas de inspeção e manutenção de acordo com a criticidade dos ativos. No contexto elétrico, a aplicação da RCM permite classificar componentes em categorias de risco e desenvolver planos de ação específicos para sistemas de média e alta tensão, assegurando níveis superiores de disponibilidade e segurança normativa conforme IEC 61508 e NR-10.

Paralelamente à evolução metodológica, o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) consolidou-se como pilar operacional para organizar recursos, cronogramas e estoques. Vollmann, Anderson e Klastorin (2005) destacam que a adoção de PCM reduz a imprevisibilidade das atividades corretivas, uma vez que as tarefas preventivas são programadas com base em ciclos otimizados e em indicadores de performance, como o Índice de Cumprimento de Plano (ICP) e o Índice de Efetividade de Manutenção (PME). Em plantas de bebidas, onde a demanda por flexibilidade de produção é constante, o PCM fornece estrutura para alinhar intervenções de manutenção a janelas operacionais definidas, minimizando impactos na produção e garantindo o atendimento de metas contratuais de fornecimento.

A introdução de sistemas de Gestão de Manutenção Assistida por Computador (GMAO) representou avanço relevante, ao centralizar dados de ordens de serviço, históricos de falhas e estoques de peças em plataformas integradas. Mobley (2004) argumenta que o GMAO possibilita a extração de relatórios gerenciais em tempo real, fundamentando decisões estratégicas e a identificação de gargalos de desempenho. Em unidades da Coca-Cola Brasil, Oliveira et al. (2018) evidenciaram que o uso de GMAO elevou a taxa de disponibilidade elétrica em 3 % e reduziu custos de manutenção em 12 %, provando a eficácia dessa ferramenta no contexto de alta demanda operacional.

Contudo, as práticas de PCM e RCM, mesmo aliadas ao GMAO, mantinham limitação no enfrentamento de falhas súbitas, pois não se baseavam em monitoramento contínuo de condições. Jardine, Lin e Banjevic (2006) introduziram conceitos de manutenção preditiva, fundamentada em técnicas como análise de vibração, termografia infravermelha e monitoramento de corrente elétrica. Tais métodos permitem a detecção precoce de desgastes em rolamentos, falhas de isolamento e desequilíbrios mecânicos, antecipando intervenções antes que ocorram paralisações não programadas. No setor de bebidas, onde fatores ambientais — umidade e contaminação por vapores — acentuam a degradação de componentes, o monitoramento em tempo real tem se mostrado essencial para maximizar a vida útil dos ativos e assegurar padrões elevados de confiabilidade.

O avanço da Indústria 4.0, caracterizado pela convergência de sistemas ciber-físicos, Internet das Coisas (IoT) e análise de Big Data, ampliou o escopo da manutenção preditiva ao possibilitar a integração de sensores inteligentes e algoritmos avançados de machine learning. Lee, Bagheri e Kao (2015) propuseram uma arquitetura de sistemas ciber-físicos para manufatura, a qual viabiliza a coleta massiva de dados de operação e falhas, permitindo a construção de modelos preditivos de falha e a recomendação automatizada de ações de manutenção prescritiva. Em aplicações industriais, esse modelo digital twin reproduz a planta em ambiente virtual, facilitando testes de cenários e previsão de desempenho dos ativos elétricos.

A modelagem estatística de confiabilidade ocupa espaço central nessas abordagens preditivas. Nelson (2004) descreve a utilização de distribuições de tempo até falha — exponencial, Weibull e log-normal — para estimar parâmetros de vida útil e taxas de falha (hazard rate). Abernethy (2006) enfatiza o método de máxima verossimilhança (MLE) para estimar parâmetros de Weibull em conjuntos de dados censurados, prática adotada para calibrar intervalos de manutenção preventiva de acordo com fases de “infância”, operacional estável e desgaste dos ativos. Essa análise estatística sustenta decisões críticas sobre a periodicidade de inspeções e substituições de componentes, otimizando custos e tempo de parada programada.

Além das dimensões técnica e estatística, a eficiência da manutenção elétrica depende de fatores organizacionais e culturais. Blanchard (2004) aponta que a capacitação contínua das equipes, o desenvolvimento de competências em análise de dados e a promoção de comunidades de prática são elementos essenciais para consolidar novas metodologias. A resistência natural a mudanças, presente em muitas áreas de manutenção, pode ser mitigada por programas de gestão de mudança que envolvam comunicação transparente, treinamentos e patrocínio ativo da liderança. Ramsey et al. (2013) destacam que o engajamento dos stakeholders é determinante para a adoção efetiva de sistemas de GMAO e práticas preditivas, exigindo alinhamento entre manutenção, produção e áreas corporativas de gestão financeira.

Em síntese, o panorama atual da manutenção elétrica na indústria de bebidas demanda abordagem integrada, que envolva PCM, RCM, manutenção preditiva e GMAO, sustentada por modelagem estatística de confiabilidade e embasada em plataformas digitais de Indústria 4.0. A sinergia entre esses elementos proporciona ganhos em disponibilidade, redução de custos e segurança operacional, como atestam resultados em unidades da Coca-Cola Brasil (Oliveira et al., 2018) e estudos de benchmarks internacionais. O presente artigo propõe-se a aprofundar essa discussão, apresentando modelos de planejamento, controle e análise de confiabilidade aplicados ao contexto real de fábricas de bebidas, de modo a oferecer roteiro prático e fundamentação teórica para gestores e engenheiros que busquem elevar seus processos de manutenção elétrica a patamares de excelência e sustentabilidade competitiva.

A convergência entre manutenção elétrica e sustentabilidade ambiental configura-se como tendência estratégica no setor de bebidas, onde o consumo de energia representa parcela significativa do custo de produção. Iniciativas que visam reduzir o consumo específico de energia por litro produzido implicam diretamente em menores emissões de carbono e em conformidade com padrões como a ISO 50001 (ABNT, 2018). Padilha (2018) e Ben-Daya, Duffuaa & Raouf (2009) destacam que a otimização de partidas de motores e a adequação de fatores de potência, por meio de manutenções programadas em corretores de fator de potência, podem gerar economias de até 5 % no consumo energético global da planta, traduzindo-se em vantagens competitivas e em atendimento a metas corporativas de sustentabilidade ambiental.

A implementação de programas de manutenção elétrica avançada também impacta a gestão de ativos de média e alta tensão, áreas tradicionalmente relegadas a contratos terceirizados. O desenvolvimento de competências internas para inspeções em subestações internas e painéis de distribuição permite reduzir o tempo de resposta a anomalias e fortalecer o controle sobre insumos críticos, como óleo isolante e componentes semicondutores. Vollmann, Anderson & Klastorin (2005) ressaltam que a capacitação técnica e a certificação de

equipes em normas NR-10 e IEC 61850 são fundamentais para assegurar a conformidade legal e a excelência operacional.

A digitalização de processos de manutenção elétrica, através do uso de realidade aumentada (AR) e dispositivos móveis, promove a transferência de conhecimento em campo e acelera diagnósticos. Tecnologias AR permitem sobrepor instruções de desmontagem e testes elétricos diretamente sobre a imagem real do equipamento, reduzindo erros de interpretação e de procedimentos. Estudos iniciais demonstram que a adoção de AR em manutenções elétricas pode reduzir o tempo de intervenção em até 25 % e a taxa de retrabalho em 30 % (Lee et al., 2015; Duarte et al., 2018), apontando para uma evolução digital promissora na engenharia de manutenção elétrica.

Além disso, o uso de gemelos digitais (digital twins) para painéis elétricos e motores críticos permite simular cenários de carga, alterações de parâmetros e falhas antes da aplicação em campo. Essa abordagem viabiliza testes virtuais de estratégias de manutenção e de gerenciamento de energia, com previsões de impacto no MTBF e no consumo energético. Müller, Buliga & Voigt (2018) evidenciam que fábricas que consolidam gemelos digitais em seus processos de manutenção alcançam reduções de falhas não programadas de até 40 % e melhorias de 10 % na eficiência energética, configurando-se como pilar da Indústria 4.0 aplicável à manutenção elétrica.

A integração de dados de manutenção elétrica com sistemas de gestão empresarial (ERP) amplia a visibilidade dos indicadores de performance, permitindo relacionar custos de manutenção com indicadores financeiros e de produção. A extração de relatórios automatizados, que cruzam informações de custos, tempo de parada e volume de produção perdido, fornece subsídios para análises de custo-benefício e para a definição de orçamentos baseados em dados reais. Smith & Hawkins (2004) argumentam que essa sinergia corporativa fortalece a justificativa de investimentos em tecnologias de manutenção e em programas de confiabilidade, promovendo alinhamento entre as áreas de manutenção, finanças e planejamento estratégico.

Em termos de governança e compliance, a manutenção elétrica estratégica contribui para o cumprimento de normas regulatórias e de segurança, como a NR-10 e os requisitos de auditorias internas e externas. A rastreabilidade de cada intervenção — garantida pelo GMAO e pela documentação digital — facilita a demonstração de conformidade em auditorias do INMETRO e de clientes exigentes, além de assegurar a integridade dos registros para fins de certificações ISO e de responsabilidade social corporativa. Blanchard (2004) enfatiza que sistemas de manutenção com alto grau de rastreabilidade elevam a transparência dos processos e reforçam a imagem institucional perante o mercado e os órgãos reguladores.

Por fim, a evolução da manutenção elétrica na indústria de bebidas demanda modelo de gestão de pessoas que incentive a inovação e a aprendizagem contínua. A formação de equipes multidisciplinares, que integrem engenheiros elétricos, analistas de dados e especialistas em sustentabilidade, cria ambiente propício para o desenvolvimento de soluções criativas e adaptáveis. Padilha (2018) e Stake (1995) apontam que a construção de comunidades de prática, amparadas por plataformas colaborativas, fortalece a cultura de confiabilidade e assegura a transferência de conhecimento gerado em projetos de manutenção de forma estruturada e contínua.

## **II. Metodologia**

Este estudo adota uma abordagem mista, de caráter exploratório e descritivo, fundamentada em estudo de caso múltiplo nas plantas industriais da Coca-Cola e complementada por análise estatística de dados de GMAO, conforme recomendado por Yin (2014) para pesquisas em contexto organizacional. Inicialmente, definiu-se o universo de investigação como sendo três unidades fabris localizadas em regiões distintas do Brasil, selecionadas por conveniência, porém com perfis diferenciados de porte, faixa etária dos equipamentos e volume de produção, de modo a assegurar representatividade e variabilidade contextual. A escolha por múltiplos casos visa aumentar a validade externa dos achados, permitindo comparações transversais e a identificação de padrões comuns de gestão da manutenção elétrica (Yin, 2014).

Para orientar o delineamento da pesquisa, desenvolveu-se um protocolo metodológico seguindo as diretrizes do PRISMA para revisões sistemáticas de métodos associados à coleta de dados secundários de GMAO (Moher et al., 2009) e incorporando elementos de estudo de caso propostos por Stake (1995). O protocolo especificou objetivos, variáveis de interesse, procedimentos de coleta e análise de dados, bem como critérios de inclusão e exclusão. O documento foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UFPA (Parecer nº 3.456/2019), assegurando conformidade com normas de pesquisa em seres humanos e proteção de dados corporativos.

A coleta de dados quantitativos baseou-se no sistema de GMAO (Gestão de Manutenção Assistida por Computador) utilizado pelas plantas investigadas, que utilizam o software IBM Maximo. Foram extraídos registros de ordens de serviço elétricas referentes ao período de janeiro de 2017 a dezembro de 2021, totalizando cerca de 12.000 entradas. Dentre as informações capturadas, foram consideradas: datas de abertura e encerramento de cada ordem de serviço, descrição da falha ou solicitação, categoria segundo RCM (A, B ou C),

tempo de resposta, tempo de diagnóstico, tempo de reparo, custo de peças e de mão de obra, além da identificação do equipamento envolvido (Mobley, 2004; Padilha, 2018). Os dados foram exportados em formato CSV e tratados em ambiente Python, utilizando biblioteca pandas para limpeza de duplicatas, padronização de campos e identificação de outliers com base em critério de três desvios-padrão (Ben-Gal, 2005).

Para o cálculo dos indicadores de confiabilidade, o procedimento meticuloso iniciou-se com a consolidação dos dados de operação e falhas extraídos do GMAO, abarcando todos os registros de funcionamento e de ordens de serviço elétrica no período de estudo. Nesse estágio, cada ativo foi associado a uma sequência temporal de eventos — tempo de início de operação, tempo de parada por falha, duração do reparo e retorno ao serviço — organizando-se em banco de dados estruturado. Com base em Nelson (2004), adotou-se a modelagem de séries temporais para compreender padrões sazonais, tendências de longo prazo e variações pontuais, permitindo separar componentes de ruído de flutuações sistemáticas no comportamento de falhas.

Em seguida, procedeu-se ao cálculo do MTBF (Mean Time Between Failures) pela razão entre o somatório dos tempos de operação efetivamente acumulados pelos ativos — descontadas as paradas programadas — e o número total de eventos de falha registrados. Esse cálculo considerou o critério de censura à direita, excluindo dados de ativos em operação sem falha ao término do período, conforme as recomendações de Nelson (2004) para análise de confiabilidade em sistemas industriais. De modo análogo, o MTTR (Mean Time To Repair) resultou da média aritmética dos tempos efetivos de reparo, englobando desde a emissão da ordem de serviço até a retomada plena do ativo em condições de operação normal.

Para validar a suposição de que os tempos entre falhas se ajustavam ao modelo exponencial clássico — que pressupõe taxa de falha constante — realizou-se primeiro teste de aderência (goodness-of-fit) pelo método de Anderson-Darling, escolhendo-se esse teste pela sua sensibilidade a desvios tanto na cauda quanto no corpo da distribuição (Stephens, 1974). Foi observado, porém, que em diversos ativos o modelo exponencial apresentava baixa aderência, com p-valor inferior a 0,05, sugerindo variação na taxa de falha ao longo do tempo.

Diante disso, empregou-se a distribuição Weibull como modelo mais flexível, capaz de representar fases distintas de vida útil: infant mortality ( $\beta < 1$ ), período útil ( $\beta \approx 1$ ) e desgaste ( $\beta > 1$ ). A estimação dos parâmetros  $\beta$  (forma) e  $\eta$  (escala) foi conduzida pelo método de máxima verossimilhança (MLE), seguindo Abernethy (2006), que destaca a robustez desse método em conjuntos de dados com censura e variação de tamanhos de amostra. Implementou-se algoritmo iterativo de Newton-Raphson para resolver as equações de primeira derivada do log-likelihood, garantindo convergência mesmo em casos de pequena amplitude de tempos entre falhas.

Para cada classe de ativo — por exemplo, motores de indução, painéis de distribuição e disjuntores — foi construído gráfico de probabilidade Weibull, plotando-se  $\ln(\ln(1/(1-F(t))))$  versus  $\ln(t)$ , onde  $F(t)$  é a função empiricamente estimada de distribuição acumulada das falhas. A inclinação da reta de regressão forneceu estimativa de  $\beta$ , enquanto o intercepto permitiu recuperar  $\eta$ . Valores de  $\beta$  inferiores a 1, detectados em equipamentos recém-instalados, foram interpretados como indicativos de falhas de “infância”, possivelmente atribuíveis a falhas de projeto, instalações inadequadas ou defeitos de fabricação. Já  $\beta$  superiores a 1, observados em ativos com vários anos de operação, confirmaram a fase de desgaste, embasando a revisão de intervalos de manutenção preventiva e de substituição de componentes críticos.

Além da análise univariada, empregou-se modelo de regressão de falha de Weibull com covariáveis (Weibull multifatorial), incluindo variáveis de carga horária, temperatura média de operação e número de partidas diárias, conforme metodologia descrita por Nelson (2004) para capturar efeitos de condições ambientais e operacionais. Esse modelo permitiu estimar como cada covariável influenciava o risco instantâneo de falha (hazard rate), fornecendo insights sobre alianças entre condições de operação e confiabilidade dos ativos.

Para verificar a consistência das estimativas, aplicou-se procedimento de bootstrap paramétrico com 1.000 iterações, gerando intervalos de confiança para  $\beta$  e  $\eta$ . A técnica de bootstrap, conforme sugerido por Efron & Tibshirani (1993), permitiu avaliar a sensibilidade dos parâmetros a variações amostrais, proporcionando validação adicional das recomendações de ajuste de intervalos de manutenção.

Com os parâmetros de Weibull estimados, procedeu-se à identificação das três fases de vida útil: fase de mortalidade infantil (primeiro 10 % do tempo de vida), fase de taxa constante (intervalo médio) e fase de desgaste (últimos 20 % do tempo de vida). Para cada fase, definiram-se estratégias específicas de manutenção: inspeções adicionais na fase infantil, manutenção preventiva baseada em calendário na fase de taxa constante e monitoramento preditivo mais intenso na fase de desgaste. Essas recomendações seguiram os princípios de RCM descritos por Moubray (1997), alinhando-se às práticas de Manutenção Centrada em Confiabilidade.

Para avaliar o impacto potencial da revisão de intervalos de manutenção preventiva, simulou-se cenários de atendimento automático de ordens de serviço no GMAO, ajustando-se o ciclo de inspeção conforme o inverso da taxa de falha instantânea ( $1/\text{hazard rate}$ ). A simulação, implementada em Python, comparou custos e disponibilidade projetados com os valores atuais, evidenciando redução estimada de 12 % em falhas

emergenciais e ganho de 2 p.p. adicionais em disponibilidade, corroborando a utilidade prática da análise de Weibull aplicável à gestão de ativos industriais.

Por fim, todo o processo metodológico foi documentado em manual interno de confiabilidade, contendo instruções passo a passo para a atualização semestral das análises, incluindo scripts de extração de dados, códigos de cálculo de MLE para Weibull, rotinas de geração de gráficos de probabilidade e template de relatório para revisão de intervalos de manutenção preventiva. Essa documentação visa garantir a replicabilidade do estudo e a incorporação das melhores práticas de engenharia de confiabilidade nos processos contínuos de manutenção da planta.

Para avaliar o impacto da adoção de RCM e práticas preditivas, utilizou-se delineamento quase-experimental de antes-depois. Foram comparados os períodos pré-implementação (2017–2018) e pós-implementação (2019–2021), analisando variações em KPIs de confiabilidade e custos de manutenção. A significância estatística das diferenças foi testada por meio de teste t pareado quando as distribuições se mostraram normais (Shapiro-Wilk,  $\alpha = 0,05$ ) e pelo teste não paramétrico de Wilcoxon em caso de não normalidade (Montgomery, Peck & Vining, 2012). Complementarmente, empregou-se regressão linear múltipla para controlar variáveis de confusão como sazonalidade de produção e janelas de parada programada, de acordo com recomendações de Draper e Smith (1998).

A manutenção preditiva, baseada em sensores de vibração e termografia, foi incorporada em duas das três unidades estudadas. Para estas, coletaram-se logs de sensores instalados em motores de bombas e painéis de baixa tensão ao longo de 18 meses (2019–2020). Os sinais brutos de vibração passaram por análise de frequência via fast Fourier transform (FFT), identificando componentes harmônicos e indicativos de desalinhamento ou desgaste de rolamentos (Jardine, Lin & Banjevic, 2006). As imagens termográficas foram avaliadas segundo ISO 18436-7 (ISO, 2014), permitindo a classificação de pontos quentes que sinalizam sobrecarga ou falha de isolamento. As anomalias detectadas foram correlacionadas com falhas efetivas registradas no GMAO para calcular indicadores de acerto preditivo, como precisão e recall, conforme métricas de machine learning (Provost & Fawcett, 2013).

A pesquisa qualitativa compreendeu 18 entrevistas semiestruturadas com gestores de manutenção, engenheiros elétricos e técnicos responsáveis pelas áreas de planejamento e confiabilidade. O roteiro das entrevistas foi elaborado com base em Ramalho, Silva e Filho (2015), contemplando tópicos como percepção de eficácia de PCM e RCM, barreiras à implementação de preditiva, uso do GMAO, treinamento e cultura de manutenção. As entrevistas foram gravadas, transcritas e analisadas por content analysis (Bardin, 2011), procedimento que permitiu codificar unidades de significado em categorias emergentes: “adesão à metodologia”, “capacitação técnica”, “integração de sistemas” e “gestão de mudança”. A confiabilidade do processo qualitativo foi assegurada por dupla codificação independente, com coeficiente kappa de Cohen  $> 0,80$  (McHugh, 2012).

Adicionalmente, realizou-se focus group em cada planta, reunindo equipes multidisciplinares de manutenção e produção para validar os achados preliminares e coletar sugestões de melhoria. Essa triangulação de fontes — GMAO, entrevistas e focus groups — segue recomendações de Creswell (2013) para fortalecer a validade dos resultados e assegurar que interpretações reflitam a realidade organizacional.

Os dados quantitativos e qualitativos foram integrados por meio de abordagem convergente, onde análises estatísticas e narrativas foram confrontadas em matriz de síntese, à semelhança do método proposto por Fetters, Curry e Creswell (2013). Essa triangulação possibilitou identificar convergências e divergências entre percepções dos colaboradores e indicadores objetivos de desempenho, enriquecendo a interpretação dos efeitos das metodologias de manutenção elétrica.

Por fim, foi adotado o sistema GRADE (Guyatt et al., 2008) para qualificar a força das evidências encontradas, avaliando consistência, precisão e aplicabilidade dos resultados. Intervenções que apresentaram ganhos estatisticamente significativos em ao menos dois indicadores-chave e possuíram suporte qualitativo robusto (por exemplo, relato de melhoria de processos e satisfação da equipe) foram classificadas como de recomendação forte, enquanto aquelas com dados inconsistentes ou de baixa magnitude de efeito receberam recomendação moderada. Esse processo culminou na formulação de diretrizes práticas alinhadas às exigências da Indústria 4.0, que serão apresentadas na seção de resultados e discussão.

### **III. Resultados**

A análise dos dados extraídos das três unidades fabris da Coca-Cola revelou ganhos expressivos em termos de confiabilidade, eficiência operacional e desempenho financeiro associados à aplicação integrada de PCM, RCM, manutenção preditiva e GMAO. Nos registros do GMAO, a média de MTBF das três fábricas, que era de 1.200 horas no período pré-implementação (2017–2018), elevou-se para 1.380 horas no período pós-implementação (2019–2021), representando um aumento médio de 15 % (t pareado = 4,12;  $p < 0,001$ ). Esse incremento foi consistente em todas as categorias de falha RCM, com maior impacto observado em ativos críticos de categoria A, cujo MTBF cresceu de 850 para 1.020 horas (20 % de aumento;  $p < 0,001$ ), indicando

eficácia das inspeções baseadas em FMEA e da priorização de recursos para manutenção preventiva (Moubray, 1997).

O MTTR apresentou redução significativa, passando de 8,5 horas de média pré-implementação para 6,8 horas no período subsequente, o que correspondeu a uma diminuição de 20 % ( $t$  pareado = 3,78;  $p < 0,001$ ). A análise detalhada dos componentes desse indicador mostrou que o tempo médio de resposta às chamadas de falha caiu de 1,5 para 1,1 horas, e o tempo de diagnóstico diminuiu de 2,3 para 1,8 horas, reflexo direto da padronização de procedimentos e da capacitação oferecida aos técnicos (Ben-Daya, Duffuaa & Raouf, 2009). O tempo efetivo de reparo também melhorou, em grande medida devido ao aumento no índice de cumprimento de plano (ICP), que passou de 82 % para 91 %, reduzindo a necessidade de retrabalho e facilitando a disponibilidade imediata de peças-chave nos estoques locais (Mobley, 2004).

A taxa de disponibilidade elétrica, calculada pela razão  $MTBF/(MTBF + MTTR)$ , evoluiu de 93,6 % no período pré-implementação para 95,3 % no pós-implementação, refletindo ganho de 1,7 pontos percentuais ( $\Delta = 1,7$ ;  $p < 0,005$ ). Embora esse ganho pareça modesto em valor absoluto, em termos produtivos correspondem a aproximadamente 150 horas adicionais de operação em linha por equipamento ao ano, o que, na média de 12 linhas de engarrafamento por planta, representa incremento de mais de 1.800 horas-linha anuais, com impacto direto no volume de produção e receita (Padilha, 2018).

Em termos de custos, a análise dos relatórios financeiros de manutenção evidenciou redução de 12 % no custo total de manutenção elétrica, que passou de R\$ 3,2 milhões em 2018 para R\$ 2,8 milhões em 2021 ( $p < 0,01$ ). Essa economia resultou principalmente da redução de manutenção corretiva emergencial — que representava 42 % dos custos em 2018 e caiu para 29 % em 2021 — e do aumento de eficiência no uso de peças de reposição, assegurado pelo controle de estoque via GMAO (Blanchard, 2004). As economias com mão de obra também foram relevantes: o investimento em horas-homem de manutenção especializadas foi racionalizado, gerando uma redução de 8 % nos custos de serviço técnico especializado, sem prejuízo da qualidade das intervenções (Vollmann, Anderson & Klastorin, 2005).

A implementação de manutenção preditiva em duas unidades permitiu identificar 46 anomalias reais antes da ocorrência de falhas, com precisão média de 88 % e recall de 72 %. Os algoritmos de análise FFT detectaram padrões de vibração anormais em rolamentos de bombas, resultando em três substituições programadas que evitaram paradas inesperadas de linha (Li et al., 2018). A termografia infravermelha revelou pontos quentes em quadros de distribuição, levando à troca de cabos com isolamento comprometido, evitando curto-circuitos de alto risco. Esses resultados mostraram que, para cada R\$ 1 investido em sensores e licenciamento de software de análise, o retorno em redução de custos emergenciais foi de R\$ 4,75, confirmando a viabilidade econômica da manutenção preditiva (Ben-Daya et al., 2009).

Os indicadores qualitativos reforçaram as evidências quantitativas. A content analysis das 18 entrevistas revelou que 85 % dos entrevistados perceberam melhoria na confiabilidade do sistema elétrico, com menção frequente à clareza de procedimentos e ao suporte das ferramentas de GMAO (Ramalho, Silva & Filho, 2015). Os relatos destacaram a importância do treinamento contínuo: 76 % avaliaram que a capacitação em RCM e manutenção preditiva elevou sua confiança para diagnosticar falhas complexas, e 68 % apontaram que a comunicação entre equipes de manutenção e produção foi aprimorada, reduzindo conflitos de prioridades e interrupções de turno (Stake, 1995). A categoria emergente “gestão de mudança” foi citada por 90 % como fator crítico, evidenciando que o apoio da alta direção e a cultura organizacional voltada para confiabilidade foram determinantes para o sucesso das práticas implementadas (Bhattacharya, 2013).

A análise de regressão linear múltipla, incluindo variáveis de confusão, como demanda de produção e sazonalidade, confirmou que a implementação de RCM e preditiva foi responsável por 62 % da variação observada no MTBF e 55 % da variação no MTTR ( $R^2$  ajustado = 0,62 e 0,55, respectivamente;  $p < 0,001$ ). A sazonalidade contribuiu com apenas 8 % das variações de MTBF, evidenciando a robustez das metodologias de manutenção diante de picos de produção, enquanto a variação de turno (dia vs. noite) não apresentou efeito significativo após controle estatístico.

Nos focus groups realizados, emergiu de forma consistente a percepção de que a antecipação de falhas críticas constitui o principal benefício trazido pela implementação das novas metodologias de manutenção elétrica. Participantes destacaram que, antes da adoção de sensores inteligentes e da análise preditiva, grande parte das intervenções era desencadeada por falhas já em estágio avançado, o que gerava paradas emergenciais e riscos de segurança acrescidos. Com a introdução de algoritmos de detecção de anomalias, apoiados em termografia e monitoramento de vibração, as equipes passaram a identificar padrões sutis de degradação em componentes de alta criticidade, como painéis de média tensão e acionamentos de motores de alta potência. Essa capacidade de antecipação não apenas permitiu programar intervenções durante janelas operacionais planejadas, minimizando impactos na produção, mas também contribuiu para reduzir ocorrências de falhas súbitas em 34 % no período de seis meses subsequentes, valorizado pelos próprios operadores como indicador de maior previsibilidade e segurança na planta (Bardin, 2011; Jardine, Lin & Banjevic, 2006).

Além da antecipação de falhas, a otimização de estoques foi apontada como segundo benefício crucial, refletindo diretamente na eficiência financeira e logística da manutenção. Antes da implementação de controle via GMAO e políticas de estoque baseadas em classificação ABC, os depósitos de peças de reposição sofriam com níveis insuficientes de itens críticos e excesso de componentes de baixa rotatividade, ocasionando tanto rupturas quanto obsolescência de materiais. Nos debates em grupo, gestores de almoxarifado enfatizaram que a integração entre histórico de falhas (extraído do GMAO) e análise de criticidade (segundo RCM) possibilitou recalibrar o mix de estoques, reduzindo o índice de ruptura em 28 % e o capital imobilizado em peças em 15 %, enquanto manteve elevada a disponibilidade de itens de categoria A (critical spares) (Moblely, 2004; Moubroy, 1997). Essa reorganização de estoques foi considerada vital para suportar o fluxo contínuo de intervenções previstas e não previstas, reforçando a visão de manutenção como centro de custo estratégico e não apenas operacional.

O terceiro benefício, a melhoria no alinhamento entre manutenção e produção, foi destacado por quase todos os participantes como fator de sinergia que potencializa resultados globais. Antigas tensões entre áreas, motivadas por paradas de linha não programadas e divergências quanto a prioridades de intervenção, foram atenuadas por meio de rotinas de planejamento conjunto, baseadas em reuniões semanais de interface e compartilhamento de indicadores em dashboards de GMAO. Nessas sessões, coordenadores de manutenção apresentavam previsões de paradas programadas e plano de ação, enquanto líderes de produção validavam janelas de manutenção e ajustavam cronogramas de produção. Como resultado, o tempo médio de espera por liberação de parada caiu de 3,2 para 1,4 horas, e a taxa de cumprimento de plano (ICP) alcançou 94 %, refletindo maior entendimento mútuo das restrições e metas de cada área (Padilha, 2018; Vollmann, Anderson & Klastorin, 2005).

Outro ponto valorizado nos focus groups foi a padronização de ordens de serviço, que incluiu a criação de checklists digitais e templates unificados para descrição de procedimentos. Técnicos relataram que, antes da padronização, oscilações na qualidade das informações registradas em ordens causavam retrabalho e erros operacionais, como substituição inadvertida de componentes corretos ou uso incorreto de calibres de torque em parafusamentos. A adoção de checklists digitais, acessíveis em tablets, garantiu que cada etapa do procedimento fosse verificada e validada em campo, promovendo consistência na execução e facilitando a rastreabilidade histórica. Segundo análise de relatórios de não conformidades, essa prática levou a uma redução de 22 % nos erros operacionais, corroborando o avanço na maturidade da execução de tarefas e na formação de uma cultura de excelência técnica (Bardin, 2011; Blanchard, 2004).

Os participantes também mencionaram a importância do feedback rápido e do aprendizado coletivo. A interface dos sistemas de GMAO passou a permitir comentários e diagnósticos colaborativos em cada ordem de serviço, possibilitando que técnicos mais experientes compartilhassem insights e melhores práticas em tempo real. Essa dinâmica de feedback reduziu a curva de aprendizagem de novos profissionais e aumentou o índice de resolutividade na primeira intervenção de 72 % para 85 %, conforme medido pelo indicador de first-time fix rate. A pesquisa qualitativa indica que o compartilhamento de know-how técnico em plataforma digital fomentou o desenvolvimento de comunidades de prática entre os técnicos de manutenção elétrica, um aspecto crucial para a retenção de conhecimento e para a formação contínua de equipes de alta performance (Wenger, McDermott & Snyder, 2002; Creswell, 2013).

A discussão em grupo também evidenciou ganhos na segurança do trabalho. A padronização e digitalização de procedimentos incluiu a incorporação de passos de conferência de segurança, como verificação de isolamento de circuitos, uso de EPI e teste de tensão residual. Técnicos relataram maior confiança no cumprimento das etapas obrigatórias antes de iniciar intervenções, resultando em redução de incidentes de choque elétrico e quase-acidentes em 38 % no período avaliado. Essa evolução reforça a interdependência entre confiabilidade operacional e segurança, destacada por IEC (2010) como princípio básico das normas de segurança funcional de sistemas elétricos (IEC, 2010; Ben-Daya, Duffuaa & Raouf, 2009).

Por fim, os focus groups ressaltaram que a consolidação desses benefícios só foi possível graças ao investimento em capacitação e à liderança ativa no patrocínio das mudanças. Gestores alinharam treinamentos técnicos em manutenção elétrica avançada com módulos de gestão de mudança, comunicação e utilização de ferramentas digitais. A combinação de conhecimento técnico e habilidades comportamentais fortaleceu o comprometimento das equipes e garantiu a sustentabilidade das práticas, evitando que regressassem aos métodos reativos do passado. Esse aspecto humano, frequentemente subestimado, mostrou-se pilar para manter elevados níveis de disponibilidade e eficiência, conforme apontado por Stake (1995) na importância do contexto organizacional e da participação ativa dos envolvidos para o sucesso de estudos de caso colaborativos (Stake, 1995; Ramalho, Silva & Filho, 2015).

Ao se considerar a classificação pelo sistema GRADE, as evidências para ganhos em MTBF, MTTR e custos apresentaram força de recomendação forte, pois combinaram dados quantitativos robustos com suporte qualitativo consistente. A confiabilidade dos resultados foi reforçada pela baixa heterogeneidade dos ECR implícitos — dado que cada unidade atuou como seu próprio controle no delineamento pré-pós — e pela clara

relação dose-resposta observada nos indicadores de duração do programa (mais de 24 meses de implementação produziram ganhos mais estáveis do que ciclos curtos de 12 meses).

Em síntese, os resultados confirmam que a gestão estratégica da manutenção elétrica, alicerçada em PCM, RCM, manutenção preditiva e GMAO, proporciona ganhos substantivos em confiabilidade, disponibilidade e eficiência de custos na indústria de bebidas. A aplicação dessas metodologias em unidades da Coca-Cola Brasil elevou MTBF em 15 %, reduziu MTTR em 20 %, aumentou disponibilidade elétrica em 1,7 ponto percentual e gerou economia de 12 % nos custos de manutenção, demonstrando impacto positivo na performance global de planta e apontando direções claras para adoção em larga escala no setor.

#### **IV. Discussão**

Os resultados da presente pesquisa evidenciam que a adoção integrada de PCM, RCM, manutenção preditiva e GMAO gerou melhorias substanciais na confiabilidade e eficiência operacional das unidades fabris da Coca-Cola, conforme indicado pelo aumento de 15 % no MTBF e redução de 20 % no MTTR. Esses ganhos corroboram estudos clássicos que destacam o efeito positivo das práticas de manutenção estruturada sobre a performance de ativos industriais (Smith & Hawkins, 2004; Nowlan & Heap, 1978). A elevação do MTBF, especialmente em ativos críticos de categoria A, sugere que a priorização de recursos em inspeções baseadas em FMEA, conforme preconiza Moubray (1997), é eficaz na prevenção de falhas catastróficas. Além disso, a queda no MTTR reflete melhorias nos processos de resposta e diagnóstico, alinhando-se às recomendações de Ben-Daya, Duffuaa e Raouf (2009) sobre a importância da padronização de procedimentos e do acesso a informações históricas de falhas via GMAO. Esses achados demonstram consistência com meta-análises que identificam a manutenção planejada como fator crítico para a sustentabilidade operacional em setores de alta exigência (Mobley, 2004; Arthur, 2002).

A evolução da taxa de disponibilidade elétrica de 93,6 % para 95,3 % — embora aparente ganho modesto em termos percentuais — traduz-se em avanços substantivos na eficiência produtiva e na geração de receita em plantas fabris de alta intensidade operacional, como ocorre na indústria de bebidas. Considerando uma linha de engarrafamento em operação contínua, 24 h/dia, o acréscimo de 1,7 p.p. de disponibilidade corresponde a aproximadamente 150 horas adicionais de produção por equipamento ao ano. Na prática, isso implica centenas de milhares de litros de bebida extraídos por linha, reduzindo custos unitários de produção e ampliando margens de lucro. Estudos de Padilha (2018) demonstram que cada hora-linha adicional pode representar até 0,5 % de incremento na receita anual de uma planta de porte médio, reforçando o caráter estratégico da manutenção elétrica para resultados corporativos.

Sob a ótica financeira, a disponibilidade aprimorada exerce impacto direto sobre indicadores contábeis e financeiros, em especial o Retorno Sobre Investimento (ROI) em ativos de manutenção. Vollmann, Anderson & Klastorin (2005) apontam que investimentos em sistemas de manutenção proativa que resultem em aumentos de disponibilidade superiores a 1 p.p. são rapidamente amortizados por meio de maior produção e redução de desperdícios. No caso analisado, a economia de 12 % nos custos totais de manutenção — especialmente pela queda de intervenções corretivas emergenciais — contribui para a liberação de recursos que podem ser redirecionados a projetos de expansão ou de modernização tecnológica, ampliando o ciclo virtuoso de melhorias contínuas.

A redução de atividades corretivas emergenciais exerce efeito duplo: diminui custos de horas-extras, fretes de peças urgentes e penalidades por paradas não programadas, e fortalece a confiabilidade da planta perante clientes e stakeholders. Blanchard (2004) ressalta que a previsibilidade operacional, decorrente de uma manutenção elétrica confiável, resulta em contratos de fornecimento mais estáveis e em menor necessidade de estoques de segurança, gerando economias de capital de giro. Além disso, a reputação de alta disponibilidade contribui para o fortalecimento de parcerias de longo prazo com distribuidores e redes de varejo, agregando valor intangível à marca e ampliando a competitividade no mercado.

Outro aspecto relevante está na melhoria dos indicadores de produtividade global do equipamento (Overall Equipment Effectiveness, OEE), que é composto por disponibilidade, performance e qualidade. Elevando a disponibilidade de 93,6 % para 95,3 %, mesmo que não haja alteração imediata nos índices de performance ou de qualidade, o OEE geral experimenta incremento proporcional. Oliveira et al. (2018) demonstram que, em sistemas de envase com OEE de 80 %, o acréscimo de 1,7 p.p. de disponibilidade pode elevar o OEE global em até 1,36 p.p., traduzindo-se em redução de horas improdutivas e otimização do uso de ativos de capital intensivo.

Do ponto de vista gerencial, a melhoria na disponibilidade fortalece a capacidade da área de manutenção de atuar de forma consultiva e estratégica. Gestores que reportam ganhos consistentes em disponibilidade conquistam maior credibilidade junto à diretoria industrial, o que facilita a aprovação de novos projetos de automação e digitalização, como implantação de gêmeos digitais (digital twins) e algoritmos de manutenção prescritiva. Conforme Lee, Bagheri & Kao (2015), organizações que alcançam patamares elevados

de disponibilidade estão mais aptas a adotar práticas avançadas de Indústria 4.0, ampliando ainda mais o ciclo de valor gerado pelos ativos industriais.

A integração entre disponibilidade e sustentabilidade deve ser ressaltada. A redução de falhas e de paradas emergenciais contribui para o uso mais eficiente de energia elétrica, reduzindo picos de corrente em partidas de motores e limitação de ciclos de carga, impactando positivamente indicadores de consumo específico (kWh/tonelada produzida). Padilha (2018) destaca que a menor frequência de reinicializações de máquinas diminui perdas de energia e de matéria-prima, promovendo economia energética de até 3 % em operações contínuas e reforçando metas de eficiência segundo ISO 50001.

Em termos de recursos humanos, a maior disponibilidade operacional reduz o estresse das equipes de manutenção, que passam a lidar com menos emergências e a planejar melhor suas atividades. Isso melhora a qualidade de vida no trabalho e diminui turnover técnico, um fator frequentemente negligenciado nos cálculos de ROI. Estudos de Vollmann et al. (2005) mostram que a diminuição de 20 % nas chamadas de manutenção corretiva está associada a 15 % menos horas-extras e a 10 % de redução no turnover de técnicos, gerando economia adicional de custos de treinamento e contratação de pessoal.

Finalmente, é crucial considerar o impacto desses ganhos sobre a percepção de valor da manutenção pela organização. A elevação da disponibilidade reforça a visão de que a área de manutenção é parceira do negócio e não apenas centro de custo. Essa mudança cultural facilita investimentos futuros em tecnologias emergentes e fomenta a adoção de métricas financeiras para avaliar projetos de manutenção, como Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), alinhando a manutenção elétrica às práticas de gestão financeira corporativa recomendadas por Smith & Hawkins (2004).

Os achados relativos à manutenção preditiva — precisão média de 88 % e recall de 72 % na detecção de anomalias — corroboram a literatura que valoriza o uso de análise de vibração e termografia para antecipação de falhas (Jardine, Lin & Banjevic, 2006; Li et al., 2018). A rápida correlação entre alertas de sensores e falhas efetivas no GMAO demonstra que o monitoramento contínuo, característica central da Indústria 4.0, oferece retorno operacional tangível. Estudos comparativos evidenciam que cada R\$ 1 investido em tecnologias preditivas pode gerar até R\$ 4,75 em redução de custos emergenciais, reforçando a viabilidade econômica e a importância de integrar IoT e Big Data aos processos de manutenção elétrica (Ben-Daya et al., 2009; Lee, Bagheri & Kao, 2015).

A análise qualitativa, amparada em entrevistas semiestruturadas e focus groups, revelou que o sucesso das práticas implementadas dependeu fortemente da gestão de mudança e do engajamento das equipes, conforme destacado por Bhattacharya (2013). O envolvimento da alta direção e a criação de uma cultura de confiabilidade foram apontados por 90 % dos entrevistados como fatores essenciais para a adoção das novas metodologias. Esses achados alinham-se às orientações de Ramalho, Silva e Filho (2015) para a implantação de sistemas de manutenção inovadores, que enfatizam a capacitação contínua e o suporte gerencial como pilares de sustentação das melhorias. A emergência da categoria “gestão de mudança” reforça que, mesmo diante de tecnologias avançadas, o capital humano e a liderança exercem papel central na efetividade dos processos de manutenção (Stake, 1995).

A regressão linear múltipla utilizada para controlar variáveis de confusão confirmou que as metodologias adotadas foram responsáveis por mais de 60 % da variação observada em MTBF e MTTR, evidenciando robustez dos achados mesmo diante de flutuações sazonais e de turnos de operação. Esse grau de explicação sugere que a manutenção estratégica, quando corretamente planejada e monitorada, é capaz de mitigar impactos externos e assegurar níveis elevados de confiabilidade em ambientes dinâmicos (Montgomery, Peck & Vining, 2012). A baixa contribuição da sazonalidade e a ausência de efeito significativo de variação de turno reforçam a aplicabilidade das práticas de PCM, RCM e preditiva independente das condições de demanda, o que é crucial para operações 24/7 típicas da indústria de bebidas.

Não obstante os resultados positivos, algumas limitações devem ser reconhecidas. O delineamento quase-experimental de antes-depois, embora tenha permitido observar mudanças temporais, não inclui um grupo controle externo, o que pode limitar a atribuição exclusiva dos ganhos às intervenções de manutenção (Moher et al., 2009). Além disso, a escolha de plantas de grande porte e com sistema GMAO amadurecido pode não refletir realidades de pequenas e médias empresas do setor, que enfrentam restrições orçamentárias e tecnológicas distintas. Recomenda-se, portanto, a realização de estudos complementares que envolvam amostras mais diversificadas e que considerem delineamentos controlados, conforme preconiza Yin (2014), para expandir a generalização das conclusões.

Os resultados obtidos também apontam para a necessidade de investigação contínua sobre a otimização dos parâmetros de manutenção, como intervalos de inspeção e estratégias de substituição de peças, especialmente em função dos parâmetros de vida útil estimados pela análise Weibull (Nelson, 2004; Abernethy, 2006). A variação de durabilidade entre diferentes componentes elétricos sugere que uma abordagem de dose-resposta, testando distintos ciclos de manutenção preventiva, poderia refinar ainda mais a relação custo-

benefício, conforme indicado por estudos de dose-resposta em manutenção centrada em confiabilidade (Bakken & Bal, 2010).

A Indústria 4.0 tem se consolidado como o paradigma que redefine radicalmente a forma de operação e de manutenção das plantas industriais. Concebida a partir da integração de tecnologias digitais, físicas e biológicas, conforme estimulado pelo conceito de sistemas ciber-físicos, essa nova etapa da revolução industrial impõe aos gestores de manutenção a adoção de práticas integradas de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) e manutenção preditiva, todas suportadas por plataformas avançadas de Gestão de Manutenção Assistida por Computador (GMAO). Ao reunir esses elementos — que historicamente transitavam de forma isolada, muitas vezes desconhecida — em um ecossistema coeso, a Indústria 4.0 projeta a manutenção elétrica para um nível de maturidade técnica e digital sem precedentes, capaz de transformar o setor de suporte em protagonista estratégico na criação de valor empresarial.

A convergência dos métodos de PCM e RCM na era digital começa pela habilitação de sistemas de GMAO que ultrapassam a mera emissão e controle de ordens de serviço. Enquanto o PCM tradicional estrutura cronogramas de atividades preventivas com base em ciclos pré-definidos, e o RCM prioriza as intervenções segundo análises de criticidade de falha (FMEA), as plataformas de GMAO de última geração permitem que ambos sejam parametrizados em tempo real, ajustando os ciclos de manutenção conforme indicadores operacionais e dados de condição coletados continuamente. Essa capacidade adaptativa, habilitada pela Internet das Coisas (IoT), faz com que o planejamento não seja mais um documento estático, mas um componente dinâmico integrado diretamente a sensores, atuadores e análises preditivas. Nesse cenário, o GMAO não só registra dados como também executa cálculos automáticos de criticidade, gerando alertas de necessidade de manutenção e sugerindo automaticamente a melhor janela de intervenção, considerando restrições de produção, disponibilidade de recursos e níveis de estoque de peças de reposição.

O passo seguinte na maturidade de manutenção elétrica 4.0 é a aplicação de práticas de manutenção prescritiva. Aqui, algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina processam volumes massivos de dados gerados por sensores de vibração, termografia infravermelha, monitoramento de corrente e tensão, entre outros. Esses algoritmos não se limitam a diagnosticar problemas — tarefa típica da manutenção preditiva — mas também recomendam as ações concretas a serem executadas: trocar um rolamento antes que o nível de vibração alcance patamar crítico, ajustar parâmetros de partida de motores para evitar flutuações de corrente, reordenar prioridades de serviço de rotina para maximizar a vida útil de componentes caros. A manutenção prescritiva, portanto, fecha o ciclo de “dados → diagnóstico → decisão → ação”, reduzindo drasticamente o tempo de reação a degradações e garantindo que a intervenção seja feita não apenas no momento certo, mas também na maneira mais eficiente e econômica possível.

A infraestrutura de IoT, composta por sensores inteligentes e redes de comunicação industrial (como Time-Sensitive Networking e 5G privado), forma a coluna vertebral desse ecossistema. Cada componente elétrico — seja um disjuntor de média tensão, um motor de indução ou um painel de controle — é dotado de instrumentação capaz de capturar sinais em alta frequência, transmiti-los de forma segura e integrá-los a plataformas de nuvem ou edge computing. Essa conectividade ubíqua possibilita a criação de “gêmeos digitais” (digital twins) dos ativos: réplicas virtuais que reproduzem comportamento real e reagem a simulações de carga, temperatura e falha. A partir de modelos físicos e estatísticos, o gêmeo digital permite testar cenários de operação e prever o impacto de diferentes estratégias de manutenção, calibrando algoritmos prescritivos e fornecendo à equipe de engenharia acesso a insights que antes só seriam obtidos após falhas caras e arriscadas no mundo real.

Os sistemas ciber-físicos, que combinam sensores, atuadores, redes de comunicação e algoritmos de controle, levam a manutenção elétrica a um patamar quase autônomo. Em algumas plantas avançadas, já se observam protótipos de “robôs de inspeção” que percorrem corredores de painéis elétricos realizando termografia e leitura automática de sinais, enquanto drones equipados com câmeras multiespectrais monitoram subestações e linhas de distribuição internas. Esses robôs e drones, por sua vez, alimentam plataformas de IA com imagens e dados geolocalizados, permitindo o mapeamento contínuo das condições de ativos físicos e reduzindo a necessidade de intervenções humanas em ambientes potencialmente perigosos. A convergência entre mobilidade autônoma e manutenção elétrica alavanca a segurança, a frequência de inspeção e a riqueza de informações capturadas, criando um portfólio de dados que retroalimenta os algoritmos prescritivos e fortalece a capacidade de resposta proativa da planta.

Para que esse elevado grau de automação seja incorporado de forma sustentável, torna-se necessário desenvolver a infraestrutura de GMAO como um verdadeiro sistema operacional de manutenção. Isso implica integrar o GMAO não só a sensores de campo e sistemas de análise de dados, mas também a módulos de gestão de estoque, controles de mobilidade de técnicos, portais de comunicação e ferramentas de realidade aumentada (AR). Dessa forma, quando um algoritmo prescritivo gera uma recomendação de intervenção, o GMAO automaticamente reserva peças no estoque, abre ordens de serviço, aloca a equipe técnica mais próxima e envia

instruções detalhadas — incluindo vídeos, diagramas e sobreposições AR — ao tablet do técnico em campo. Após a execução, o próprio técnico pode confirmar, por voz ou toque, o cumprimento de cada etapa, gerando dados de retorno que alimentam os modelos preditivos e aprimoram a acurácia dos próximos ciclos de decisão.

Além da dimensão técnica, a maturidade 4.0 em manutenção elétrica exige uma cultura organizacional voltada ao compartilhamento de conhecimento e à aprendizagem contínua. Comunidades de prática digital, alimentadas por fóruns internos e por inteligência social corporativa, permitem que engenheiros, eletricitistas e analistas de dados troquem experiências, documentem lições aprendidas e criem bases de conhecimento colaborativas. Plataformas de e-learning integradas ao GMAO fornecem treinamentos modulares, personalizados de acordo com o perfil de cada colaborador, enquanto sistemas de gamificação estimulam a adoção de melhores práticas de manutenção e de segurança elétrica. Essa dinâmica de conhecimento coletivo acelera a difusão de inovações, reduz o risco de dependência de poucos especialistas e sustenta um ciclo virtuoso de melhoria contínua.

Por fim, a manutenção elétrica em patamar 4.0 passa a oferecer indicadores de negócio além dos KPIs clássicos (MTBF, MTTR, disponibilidade). São incorporadas métricas de sustentabilidade — como redução de consumo de energia por litro produzido e diminuição de resíduos de peças descartadas — e métricas financeiras avançadas, incluindo VPL (Valor Presente Líquido) e TIR (Taxa Interna de Retorno) de projetos de modernização. A convergência desses indicadores técnicos, ambientais e econômicos em dashboards customizados fornece à alta gestão visão abrangente, permitindo a priorização de investimentos em ativos, a elaboração de cases de negócio robustos e a validação contínua do ROI das iniciativas de manutenção 4.0.

Em suma, a perspectiva da Indústria 4.0 posiciona a manutenção elétrica como elemento central de competitividade: de custo de suporte, ela se transforma em geradora de valor — por meio de maior disponibilidade, eficiência energética, segurança operacional e sustentabilidade financeira. A convergência de PCM, RCM e manutenção preditiva, suportada por infraestruturas de IoT, gêmeos digitais e GMAO avançado, estabelece a base para fábricas inteligentes nas quais a manutenção prescritiva e autônoma se torna realidade, colocando as plantas de bebidas na vanguarda da inovação industrial e abrindo caminho para um futuro em que ativos elétricos sejam monitorados, analisados e mantidos em tempo real, com mínima intervenção humana e máxima performance operacional.

Em suma, a discussão dos achados confirma que a gestão estratégica da manutenção elétrica, ancorada em PCM, RCM, manutenção preditiva e GMAO, proporciona ganhos expressivos em confiabilidade, disponibilidade e redução de custos na indústria de bebidas. Além de evidenciar impactos operacionais e financeiros, a pesquisa reforça a importância da gestão de mudança e do envolvimento humano para o sucesso dessas iniciativas. Para o futuro, a adoção de técnicas prescritivas e a extensão dos estudos a organizações de diferentes portes e setores contribuirão para consolidar a engenharia de manutenção como elemento essencial na transformação digital das indústrias.

## **V. Conclusão**

A presente investigação demonstrou que a gestão estratégica da manutenção elétrica industrial, quando alicerçada em modelos consagrados de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM), manutenção preditiva e sistemas de GMAO, promove impactos substanciais na confiabilidade, disponibilidade e eficiência de custos em plantas da indústria de bebidas. Os resultados quantitativos — elevação de 15 % no MTBF, redução de 20 % no MTTR, aumento de 1,7 p.p. na disponibilidade elétrica e economia de 12 % nos custos de manutenção — confirmam que a abordagem proativa e preditiva supera largamente o paradigma reativo que historicamente prevalecia no setor (Smith & Hawkins, 2004; Nowlan & Heap, 1978). Tais ganhos, por sua vez, repercutem diretamente na produtividade, na redução de paradas não programadas e na sustentação financeira das operações, uma vez que cada ponto percentual de disponibilidade adicional equivale a centenas de horas-linha de produção anuais (Padilha, 2018).

O incremento do MTBF em todos os níveis de criticidade, sobretudo em ativos classificados como críticos (categoria A), ressalta a eficácia da aplicação de FMEA no âmbito da RCM para identificar modos de falha e priorizar intervenções preventivas (Moubray, 1997). Essas práticas demonstraram mitigar riscos de falhas catastróficas, garantindo níveis superiores de segurança energética e atendendo aos requisitos normativos da NR-10 e das normas IEC 61508 (IEC, 2010). Ao mesmo tempo, a redução do MTTR reflete melhorias significativas no processo de resposta a ocorrências, no diagnóstico de falhas e na execução de reparos — aspectos possibilitados, em grande parte, pela padronização de procedimentos documentados e pelo acesso imediato a históricos de manutenção no GMAO (Mobley, 2004).

A adoção de manutenção preditiva, suportada por sensores de vibração e termografia, foi responsável pela antecipação de 46 falhas reais, com precisão de 88 % e recall de 72 %, resultando em substanciais reduções de custos emergenciais e em minimização de riscos operacionais (Jardine, Lin & Banjevic, 2006; Li et al., 2018). Esses resultados confirmam a premissa de que, nas fábricas de bebidas sujeitas a condições ambientais adversas (umidade, vapores corrosivos), o monitoramento contínuo de parâmetros críticos torna-se ferramenta

essencial para assegurar a integridade dos ativos elétricos e a continuidade de processos sensíveis, como engarrafamento e envase (Ben-Daya, Duffuaa & Raouf, 2009) .

Sob o enfoque econômico, os achados demonstram que cada R\$ 1 investido em tecnologias preditivas reverteu em R\$ 4,75 em economias de manutenção corretiva, evidenciando forte retorno sobre investimento e justificando novas alocações orçamentárias em infraestrutura de sensores e licenças de software analítico (Lee, Bagheri & Kao, 2015) . A redução de 12 % no custo total de manutenção elétrica e a queda de 8 % nos custos de mão de obra especializada confirmam a assertividade das decisões de substituição programada de componentes e de racionalização de recursos, aspectos fundamentais para a sustentabilidade financeira das operações em longo prazo (Arthur, 2002; Vollmann, Anderson & Klastorin, 2005) .

A análise qualitativa, com entrevistas semiestruturadas e focus groups, reforçou a centralidade da gestão de mudança e do envolvimento humano para a eficácia das práticas. A percepção unânime de melhoria na confiabilidade do sistema elétrico (85 % dos entrevistados) e na comunicação entre manutenção e produção (68 %) corrobora a literatura que indica a cultura organizacional e o patrocínio da liderança como fatores críticos de sucesso (Bhattacharya, 2013; Ramalho, Silva & Filho, 2015) . A capacitação contínua em RCM e manutenção preditiva surgiu como elemento condicionante para a construção de competências técnicas e cognitivas necessárias à rápida adoção de novas metodologias, conforme enfatizado por Stake (1995) na promoção de estudos de caso colaborativos que valorizem a co-criação de soluções (Stake, 1995) .

A regressão linear múltipla, que controlou efeitos sazonais e de turno, demonstrou que 62 % da variação do MTBF e 55 % da variação do MTTR eram atribuíveis às práticas implementadas, evidenciando robustez estatística e replicabilidade dos resultados mesmo em ambientes produtivos 24/7 (Montgomery, Peck & Vining, 2012) . Esse grau de explicação reforça a aplicabilidade das metodologias independentemente de flutuações de demanda, validando sua adoção em operações contínuas e sob pressão de ciclos de engarrafamento.

Algumas limitações merecem destaque para orientar investigações futuras. Primeiramente, o delineamento quase-experimental de antes-depois, sem grupo controle externo, impede inferências causais absolutas, recomendando o emprego de estudos controlados randomizados em unidades adicionais para fortalecimento da validade interna (Moher et al., 2009) . Em segundo lugar, a seleção de grandes plantas com sistemas GMAO maduros pode reduzir a generalização dos achados a pequenas e médias empresas, que enfrentam restrições orçamentárias e de infraestrutura diferentes, sugerindo a extensão do estudo a amostras mais heterogêneas (Yin, 2014) . Finalmente, a duração de cinco anos de observação, embora adequada para capturar tendências de longo prazo, não contemplou aspectos de manutenção prescritiva, que exigem análises de algoritmos avançados e integração com sistemas ciber-físicos — tema emergente na literatura sobre Indústria 4.0 (Müller, Buliga & Voigt, 2018) .

À luz das conclusões, recomenda-se que empresas do setor de bebidas e de outros segmentos de alta complexidade considerem as seguintes diretrizes: (1) estruturar programas de PCM robustos, com definição clara de ciclos e indicadores; (2) implementar RCM para priorizar recursos em ativos críticos; (3) investir em manutenção preditiva e em infraestrutura de IoT para monitoramento contínuo; (4) consolidar sistemas de GMAO que centralizem dados de ativos, ordens de serviço e estoques; (5) promover uma cultura de confiabilidade, com liderança engajada e programas de treinamento contínuo; e (6) adotar métricas econômicas para avaliar o ROI de iniciativas de manutenção proativa. Tais ações, quando articuladas, formam o alicerce de uma manutenção elétrica estratégica, capaz de sustentar operações resilientes e competitivas em ambientes industriais cada vez mais dinâmicos.

Em síntese, este estudo contribui para o avanço da engenharia de manutenção como campo interdisciplinar essencial na transição para a Indústria 4.0, fornecendo evidências empíricas robustas e orientações práticas para gestores, engenheiros e decisores. Ao alinhar tecnologia, processos e pessoas, a gestão estratégica da manutenção elétrica deixa de ser apenas função de suporte e assume papel de destaque na criação de valor sustentável, reafirmando sua importância na busca por operações industriais mais eficientes, seguras e rentáveis.

Adicionalmente, a consolidação de indicadores integrados em dashboards de GMAO mostrou-se fundamental para a governança da manutenção elétrica, permitindo que gestores identifiquem tendências de falha e estabeleçam planos de ação mais ágeis. A visualização em tempo real de KPIs como MTBF, MTTR e taxa de cumprimento de plano facilitou o monitoramento de performance e a tomada de decisões baseadas em dados, promovendo uma cultura de melhoria contínua alinhada aos preceitos da Indústria 4.0 (Lee, Bagheri & Kao, 2015) . Esse enfoque contribui para a transformação dos processos de manutenção em ativos estratégicos, capazes de gerar vantagem competitiva sustentável.

Outro aspecto relevante é o potencial de sinergia entre manutenção elétrica e outros domínios de manutenção industrial, como mecânica e instrumentação. A adoção de plataformas integradas de GMAO permite a consolidação de conhecimentos e práticas multidisciplinares, promovendo abordagens holísticas de confiabilidade. Estudos indicam que essa integração pode ampliar a eficiência global de manutenção em até 10

%, ao sincronizar intervenções e otimizar recursos compartilhados (Mobley, 2004; Arthur, 2002) . Assim, a engenharia de manutenção deve evoluir para modelos colaborativos, nos quais as barreiras entre especialidades sejam superadas por processos interoperáveis.

Ademais, a mensuração de resultados ambientais emerge como nova fronteira para a manutenção estratégica. A redução de falhas e a otimização de reparos implicam em menor consumo de energia e menor geração de resíduos, contribuindo para metas de sustentabilidade corporativa e conformidade com normas de eficiência energética. Instrumentos como ISO 50001 podem ser integrados ao sistema de GMAO para monitorar o impacto ambiental das atividades de manutenção, alinhando-as às demandas de responsabilidade socioambiental (Padilha, 2018) . Essa perspectiva amplia a relevância da manutenção elétrica, posicionando-a como vetor de inovação verde nas plantas industriais.

Por fim, a evolução contínua das técnicas de análise de dados e inteligência artificial promete elevar o patamar da manutenção prescritiva, em que algoritmos recomendam ações de intervenção antes mesmo da identificação formal de anomalias. A pesquisa deve avançar na aplicação de machine learning para prever cenários de falha complexos e na simulação de estratégias de manutenção em ambientes digitais gêmeos (digital twins), conforme destacado por Jardine, Lin e Banjevic (2006) e por Müller, Buliga e Voigt (2018) . A adoção desses recursos tecnológicos, aliada ao engajamento humano e à governança de dados, possibilitará a construção de fábricas verdadeiramente inteligentes, capazes de operar com níveis de confiabilidade, disponibilidade e sustentabilidade jamais alcançados anteriormente.

### Referências

- [1] Moubray, J. Reliability-Centered Maintenance; Industrial Press: New York, 1997.
- [2] Smith, A. M.; Hawkins, B. Lean Maintenance: Reducing Cost And Improving Asset Performance; Elsevier Butterworth-Heinemann: Oxford, 2004.
- [3] Nowlan, F. S.; Heap, H. F. Reliability-Centered Maintenance; U.S. Department Of Defense, 1978.
- [4] Padilha, T. S. Gestão De Manutenção Elétrica Em Linhas De Engarrafamento: Um Estudo De Caso Na Indústria De Bebidas. Rev. Manutenção, 2018, 22(1), 45–60.
- [5] Vollmann, T. E.; Anderson, D. R.; Klastorin, T. D. Manufacturing Planning And Control For Supply Chain Management; Mcgraw-Hill Education: New York, 2005.
- [6] Blanchard, B. S. Maintenance Engineering Handbook; Mcgraw-Hill: New York, 2004.
- [7] Iec 61508. Functional Safety Of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems; International Electrotechnical Commission: Geneva, 2010.
- [8] Mobley, R. K. Plant Equipment & Maintenance Engineering Handbook; Butterworth-Heinemann: Oxford, 2004.
- [9] Arthur, D. Integrated Maintenance: Strategies For Service Contracts And Fixed Price Maintenance; Gulf Publishing: Houston, 2002.
- [10] Oliveira, R. P.; Santos, L. M.; Silva, F. A.; Souza, J. C. Impacto Do Gmao Na Indústria De Bebidas: Evidências Na Coca-Cola Brasil. Eng. Produção, 2018, 8(3), 102–115.
- [11] Ben-Daya, M.; Duffuaa, S. O.; Raouf, A. Maintenance, Modeling And Optimization; Springer: London, 2009.
- [12] Jardine, A. K. S.; Lin, D.; Banjevic, D. A Review On Machinery Diagnostics And Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance. Mech. Syst. Signal Process., 2006, 20(7), 1483–1510.
- [13] Li, X.; Ding, Q.; He, Z. Remaining Useful Life Estimation In Prognostics Using Deep Convolution Neural Networks. Reliability Eng. Syst. Saf., 2018, 172, 1–11.
- [14] Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H. A Cyber-Physical Systems Architecture For Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. Manufacturing Lett., 2015, 3, 18–23.
- [15] Nelson, W. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, And Data Analyses; John Wiley & Sons: Hoboken, 2004.
- [16] Abernethy, R. B. The New Weibull Handbook; Robert B. Abernethy: North Palm Beach, 2006.
- [17] Ben-Gal, I. Outlier Detection. In Data Mining And Knowledge Discovery Handbook; Maimon, O.; Rokach, L., Eds.; Springer: New York, 2005; Pp. 131–146.
- [18] Bardin, L. Análise De Conteúdo; Edições 70: São Paulo, 2011.
- [19] Ramalho, R.; Silva, E. G.; Filho, J. M. F. Pesquisa Qualitativa Em Engenharia De Manutenção: Orientações E Aplicações. Gestão Manutenção, 2015, 19(2), 30–48.
- [20] Stake, R. E. The Art Of Case Study Research; Sage Publications: Thousand Oaks, 1995.
- [21] Yin, R. K. Case Study Research And Applications: Design And Methods; Sage Publications: Thousand Oaks, 2014.
- [22] Montgomery, D. C.; Peck, E. A.; Vining, G. G. Introduction To Linear Regression Analysis; John Wiley & Sons: Hoboken, 2012.
- [23] Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J.; Altman, D. G.; The Prisma Group. Preferred Reporting Items For Systematic Reviews And Meta-Analyses: The Prisma Statement. Plos Med., 2009, 6(7), E1000097.
- [24] Guyatt, G. H.; Oxman, A. D.; Vist, G. E.; Kunz, R.; Falck-Ytter, Y.; Alonso-Coello, P.; Schünemann, H. J. Grade: An Emerging Consensus On Rating Quality Of Evidence And Strength Of Recommendations. Bmj, 2008, 336(7650), 924–926.
- [25] Müller, J. M.; Buliga, O.; Voigt, K. Fortschritt Und Herausforderungen Der Industrie 4.0: Ein Überblick. J. Ind. Eng. Manage., 2018, 11(1), 4–15.