

Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

Otimização energética e retrofit em sistemas eletromecânicos industriais: uma análise sistemática sobre diagnóstico de falhas, automação e sustentabilidade operacional

Otimização energética e retrofit em sistemas eletromecânicos industriais: uma análise sistemática sobre diagnóstico de falhas, automação e sustentabilidade operacional

Energy optimization and retrofit in industrial electromechanical systems: a systematic analysis on fault diagnosis, automation, and operational Sustainability

Sandro Mariano Rodrigues - Técnico em Eletrônica. Especialista em Automação Industrial e Gestão de Projetos Elétricos.

Resumo

A obsolescência da infraestrutura industrial, aliada à crescente demanda por eficiência energética e conformidade ambiental, impõe desafios críticos à engenharia moderna e à gestão de ativos físicos. O presente artigo científico propõe uma análise exaustiva e técnica sobre as estratégias de *retrofit* (modernização) e automação de sistemas eletromecânicos, focando na transição mandatória para os paradigmas da Indústria 4.0. A metodologia baseia-se em uma revisão bibliográfica sistemática e crítica, correlacionando normas técnicas internacionais (IEC/ISO), teorias de manutenção centrada em confiabilidade e protocolos avançados de eficiência energética. O estudo estrutura-se em sete eixos temáticos de alta densidade, explorando desde a termodinâmica da dissipação de energia em motores e acionamentos até a arquitetura de redes industriais para diagnóstico remoto de falhas. Discute-se pormenorizadamente como a implementação de diagnósticos baseados em dados (*data-driven*) atua como vetor de redução de custos operacionais (OPEX) e extensão do ciclo de vida dos ativos (CAPEX). Os resultados indicam que a sustentabilidade industrial depende da integração simbiótica entre a modernização do *hardware* e a inteligência do controle automatizado. Conclui-se que a engenharia de manutenção desempenha um papel fundamental na orquestração dessa transformação tecnológica complexa.

Palavras-chave: Retrofit Industrial. Eficiência Energética. Automação. Diagnóstico de Falhas. Manutenção Preditiva.

Abstract

The obsolescence of industrial infrastructure, combined with the growing demand for energy efficiency and environmental compliance, imposes critical challenges on modern engineering and physical asset management. This scientific article proposes an exhaustive and technical analysis of retrofit (modernization) strategies and automation of electromechanical systems, focusing on the mandatory transition to Industry 4.0 paradigms. The methodology is based on a systematic and critical bibliographic review, correlating international technical standards (IEC/ISO), reliability-centered maintenance theories, and advanced energy efficiency protocols. The study is structured into seven high-density thematic axes, exploring everything from the thermodynamics of energy dissipation in motors and drives to the architecture of industrial networks for remote fault diagnosis. It discusses in detail how the implementation of data-driven diagnostics acts as a vector for reducing operational costs (OPEX) and extending asset lifecycles (CAPEX). The results indicate that industrial sustainability depends on the symbiotic integration between hardware modernization and automated control intelligence. It is concluded that maintenance engineering plays a fundamental role in orchestrating this complex technological transformation.

Keywords: Industrial Retrofit. Energy Efficiency. Automation. Fault Diagnosis. Predictive Maintenance.

1. Introdução

A indústria global contemporânea enfrenta um momento de inflexão estrutural, caracterizado pela necessidade imperativa de conciliar produtividade em escala com responsabilidade ambiental e

Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

eficiência energética rigorosa. Segundo as análises macroeconômicas de **Rifkin (2011)**, a sociedade industrial vivencia a consolidação da Terceira Revolução Industrial, onde a eficiência termodinâmica e a comunicação lateral de energia constituem os pilares fundamentais da nova economia produtiva. Nesse contexto desafiador, o parque industrial opera majoritariamente com uma base instalada de equipamentos eletromecânicos que, embora mecanicamente robustos, foram projetados e comissionados em épocas em que o custo da energia não representava uma variável crítica na matriz de custos. A obsolescência tecnológica desses ativos não se manifesta apenas na dificuldade de manutenção, mas na incapacidade de interagir com sistemas digitais modernos, criando ilhas de ineficiência que drenam a rentabilidade das operações. A modernização desses ativos, processo tecnicamente denominado *retrofit*, é defendida por **Groover (2011)** não apenas como uma questão de atualização tecnológica superficial, mas como uma estratégia de sobrevivência econômica essencial para evitar o sucateamento prematuro de capital fixo.

O problema central que motiva esta investigação científica aprofundada reside na complexidade técnica e gerencial de implementar projetos de modernização em plantas em operação contínua (*brownfield*), onde a interrupção da produção deve ser nula ou mínima. A falha no diagnóstico preciso das ineficiências energéticas e a aplicação inadequada de tecnologias de automação podem resultar em investimentos vultosos com retorno sobre o investimento (ROI) negativo ou nulo. **Bolton (2010)** argumenta, em sua obra seminal sobre sistemas mecatrônicos, que a abordagem integrada, unindo engenharia mecânica, eletrônica e de computação, é a única via para resolver esses gargalos de performance. A hipótese defendida neste estudo é que a aplicação de uma metodologia estruturada de diagnóstico de performance, seguida por um plano de *retrofit* faseado e baseado em normas técnicas rigorosas (como a ISO 50001), constitui a abordagem mais eficaz e sustentável. A análise detalhada a seguir dissecar os componentes físicos, lógicos e gerenciais dessa abordagem, oferecendo um arcabouço teórico robusto para a engenharia de manutenção e projetos.

2. Análise termodinâmica e eficiência energética em motores e acionamentos elétricos

O consumo de energia elétrica em instalações industriais é majoritariamente atribuído ao funcionamento de motores elétricos e seus sistemas de acionamento, que representam a força motriz da manufatura. De acordo com os guias técnicos da **WEG (2020)** e relatórios de agências de energia, os motores elétricos consomem cerca de 70% da energia industrial global, tornando-os o alvo primário de qualquer programa de eficiência. A ineficiência nesses sistemas não é apenas elétrica, mas decorre de fatores termodinâmicos e eletromagnéticos complexos, como perdas por histerese magnética, correntes de Foucault no núcleo, perdas Joule nos enrolamentos e atrito mecânico nos mancais. **Parekh (2003)** detalha em seus estudos sobre controle de motores que a operação de motores de indução em carga parcial resulta em uma queda drástica e não linear no fator de potência

Ano V, v.2 2025 | **submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025**

e na eficiência global, criando um desperdício oculto que muitas vezes escapa às auditorias superficiais baseadas apenas em dados de placa.

A substituição simples de motores *standard* por motores de alto rendimento (classes IE3 ou IE4), conforme normatizado pela **International Electrotechnical Commission (IEC 60034-30, 2008)**, é uma medida inicial necessária, mas insuficiente se não acompanhada de uma revisão sistêmica do controle. A introdução de Inversores de Frequência (VFDs) permite ajustar a velocidade do motor à demanda real da carga, explorando as leis de afinidade em bombas e ventiladores, onde a redução da velocidade gera uma redução cúbica na potência consumida. No entanto, **Rashid (2013)** alerta que a introdução massiva de eletrônica de potência gera distorções harmônicas na rede elétrica, que, se não mitigadas, causam aquecimento excessivo em transformadores e condutores neutros, anulando parte dos ganhos de eficiência obtidos no eixo do motor através do aumento das perdas no sistema de distribuição.

A qualidade da energia elétrica (*Power Quality*) emerge, portanto, como um vetor crítico na engenharia de eficiência. A presença de harmônicos de corrente e tensão pode excitar frequências de ressonância mecânica e elétrica, reduzindo a vida útil dos componentes. O diagnóstico desses distúrbios exige o uso de analisadores de espectro de alta precisão e a implementação de filtros ativos ou passivos sintonizados. Além disso, a gestão térmica dos painéis elétricos é vital; a regra de Arrhenius, citada amplamente na literatura de confiabilidade, indica que cada 10°C de aumento na temperatura de operação reduz a vida útil do isolamento dos componentes eletrônicos pela metade. Projetos de *retrofit* devem incluir estudos termográficos e de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para garantir a refrigeração adequada dos novos *drives*.

A recuperação de energia cinética em sistemas de movimentação de carga representa o nível avançado da otimização termodinâmica. Em aplicações com alta inércia e ciclos de frenagem frequentes, como pontes rolantes, elevadores de carga e centrífugas, a energia cinética é tradicionalmente dissipada como calor em resistores de frenagem, um desperdício termodinâmico puro. A tecnologia de *drives* regenerativos (*Active Front End*) permite devolver essa energia à rede elétrica com baixa distorção harmônica, transformando o motor em gerador durante a desaceleração. A implementação da norma **ISO 50001 (2018)** fornece o arcabouço gerencial para validar essas economias, exigindo o estabelecimento de uma linha de base energética (*energy baseline*) e indicadores de desempenho (EnPIs) auditáveis.

A seleção e o dimensionamento de cabos e condutores também impactam a eficiência global da instalação. O dimensionamento baseado apenas na capacidade de corrente (ampacidade) muitas vezes ignora as perdas por queda de tensão (I^2R) ao longo de grandes distâncias em plantas industriais. **Silva (2015)** enfatiza que o redimensionamento de circuitos críticos para reduzir a impedância é uma medida de *retrofit* elétrico que oferece retorno financeiro garantido ao longo da vida útil da instalação.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

O engenheiro deve avaliar o custo do ciclo de vida (*Life Cycle Costing*) ao especificar materiais, optando por soluções que reduzam o OPEX (custo operacional) mesmo que impliquem em um CAPEX (investimento inicial) ligeiramente superior.

A correção do fator de potência deve ser realizada de forma dinâmica e distribuída, e não apenas no ponto de entrega da energia. A instalação de bancos de capacitores fixos pode gerar sobretensões em momentos de carga leve e interagir perigosamente com os harmônicos gerados pelos inversores. O uso de compensadores estáticos de reativos (SVC) ou filtros ativos híbridos é a abordagem recomendada para plantas modernas. O monitoramento contínuo das grandezas elétricas através de medidores inteligentes integrados ao sistema SCADA permite identificar desvios de consumo em tempo real e atuar preventivamente.

Conclui-se que a eficiência energética em sistemas motrizes não é alcançada pela simples troca de componentes ("plug and play"), mas pela otimização da interação física entre motor, acionamento, carga e rede elétrica. O diagnóstico termodinâmico e elétrico preciso é o pré-requisito absoluto para qualquer intervenção de sucesso, exigindo do profissional técnico uma visão holística que vai da física do eletromagnetismo à gestão de custos industriais.

3. O processo de retrofit: metodologias de engenharia reversa e integração de sistemas

O *retrofit* de máquinas industriais é um processo de engenharia complexo que envolve a atualização do sistema de controle, acionamento e segurança, mantendo a estrutura mecânica original que ainda possui vida útil residual. **Groover (2011)** destaca que essa estratégia é particularmente vantajosa para máquinas-ferramentas pesadas e linhas de montagem robustas, onde o desgaste mecânico é lento, mas a obsolescência eletrônica é acelerada (ciclos de vida de componentes eletrônicos são de 5 a 7 anos, enquanto estruturas mecânicas duram décadas). O primeiro passo crítico é o diagnóstico estrutural e a engenharia reversa, muitas vezes necessária devido à inexistência de documentação técnica confiável de equipamentos antigos.

A engenharia reversa envolve o mapeamento detalhado de todas as I/Os (entradas e saídas), a análise das lógicas de intertravamento *hard-wired* (a relés) e a compreensão profunda da sequência operacional da máquina. **Bolton (2010)** ressalta que sem esse entendimento físico do processo, a migração para controladores lógicos programáveis (CLPs) modernos está fadada ao fracasso. É necessário traduzir a "inteligência" que estava distribuída em contadores e came mecânicos para linhas de código estruturadas (IEC 61131-3), garantindo que as novas lógicas reproduzam a funcionalidade original com maior precisão e flexibilidade.

A segurança operacional é um imperativo legal e ético inegociável no *retrofit*. Máquinas antigas raramente atendem às normas de segurança contemporâneas, como a NR-12 no Brasil ou as diretrizes da OSHA e ANSI nos EUA. **Almeida (2018)** discute extensivamente a necessidade de

Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

implementar categorias de segurança (Categoria 3 ou 4) e Níveis de Performance (PLd ou PLe) através de *hardware* certificado. A instalação de cortinas de luz, *scanners* de área, relés de segurança monitorados e válvulas hidráulicas de segurança deve ser integrada ao novo painel de controle desde a fase de projeto (*Safety by Design*).

A conectividade e a integração de dados são os objetivos funcionais que justificam o *retrofit* na era da Indústria 4.0. A substituição de controladores proprietários e isolados por CLPs com capacidade de comunicação em rede aberta (Ethernet/IP, Profinet, OPC UA) permite a extração de dados de produção e manutenção em tempo real. **Karnopp et al. (2012)** enfatizam a importância da modelagem dinâmica dos sistemas para garantir que os novos controladores digitais possam gerenciar as inércias e dinâmicas físicas da máquina antiga sem causar instabilidade, ressonância mecânica ou desgaste prematuro de atuadores.

A gestão da obsolescência é um dos principais motivadores econômicos do *retrofit*. A indisponibilidade de peças de reposição para sistemas legados coloca a continuidade da produção em risco iminente. A padronização de componentes com famílias atuais de mercado reduz drasticamente o custo de estoque de manutenção (MRO) e garante suporte técnico do fabricante. **Mobley (2014)** argumenta que a padronização e a intercambiabilidade são pilares da manutenibilidade moderna. O planejamento da migração deve minimizar o tempo de parada (*downtime*), utilizando técnicas de pré-montagem de *backplates* e chicotes elétricos.

O comissionamento e o *startup* do sistema modernizado exigem protocolos de teste rigorosos (FAT e SAT). A simulação do *software* em bancada, utilizando gêmeos digitais simplificados, permite validar a lógica de controle e as interfaces de segurança antes da conexão física com a máquina, reduzindo o risco de acidentes e danos ao equipamento. A sintonia fina das malhas de controle PID e dos perfis de movimento dos servomotores deve ser realizada com a máquina em carga, exigindo instrumentação adequada.

A interface homem-máquina (IHM) é a janela do operador para o processo e deve ser completamente redesenhada. As IHMs antigas, baseadas em botões e lâmpadas, forneciam pouca informação diagnóstica. As novas telas *touchscreen* devem ser projetadas com foco na usabilidade e na ergonomia cognitiva, apresentando informações claras, alarmes hierarquizados e históricos de eventos que auxiliem o operador e a manutenção na tomada de decisão rápida.

Conclui-se que o *retrofit* não é uma medida paliativa ou um reparo provisório, mas uma atividade de engenharia de alta precisão que revitaliza ativos de capital. Exige uma visão multidisciplinar que abrange mecânica, elétrica, segurança e *software*, entregando uma máquina tecnologicamente "nova" com um custo e prazo significativamente menores do que a aquisição de um novo ativo de capital.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

4. Manutenção preditiva e diagnóstico baseado em dados (data-driven maintenance)

A evolução das estratégias de manutenção industrial, partindo da corretiva (reativa) para a preventiva (baseada em tempo/ciclos) e culminando na preditiva (baseada na condição), é habilitada pela tecnologia de sensoriamento avançado e análise de dados. **Mobley (2014)**, uma das maiores autoridades mundiais em engenharia de manutenção, define a manutenção preditiva como a aplicação de tecnologias para determinar a condição real de equipamentos em operação, a fim de prever falhas futuras. Técnicas como análise de vibração espectral, termografia infravermelha e análise tribológica de óleo permitem identificar falhas em estágio incipiente, muito antes que causem a parada funcional da máquina.

A automação moderna permite a implementação de sistemas de monitoramento de condição *online* e contínuo, superando as limitações das rotas de inspeção manuais e periódicas. Sensores inteligentes (acelerômetros, termopares, sensores de corrente) conectados via IIoT (*Industrial Internet of Things*) enviam dados brutos para processamento na borda (*Edge Computing*) ou na nuvem. **Santos (2016)**, em sua obra sobre Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM), reforça que a análise de tendências é mais valiosa do que a medição pontual. O desvio gradual de parâmetros monitorados indica a degradação física de componentes específicos, permitindo o planejamento cirúrgico da intervenção de manutenção.

A Análise de Assinatura Elétrica (ESA - *Electrical Signature Analysis*) e a Análise de Corrente do Motor (MCSA) são técnicas poderosas que permitem diagnosticar problemas mecânicos e elétricos (como barras de rotor quebradas, excentricidade, desalinhamento) apenas analisando as formas de onda de tensão e corrente no painel, sem a necessidade de instalar sensores no motor. Essa abordagem não intrusiva é ideal para ambientes industriais hostis ou motores de difícil acesso. O conhecimento profundo dessas técnicas permite ao especialista diferenciar problemas de carga de problemas de motor.

A Análise de Causa Raiz (RCA - *Root Cause Analysis*) é potenciada pelos dados históricos armazenados nos bancos de dados dos sistemas de automação (*Historians*). Em vez de apenas substituir um componente falhado, a engenharia pode realizar uma "autópsia digital", analisando o histórico de carga, tensão, temperatura e alarmes para entender *por que* a falha ocorreu (ex: sobrecarga crônica, operação fora da curva, problemas de qualidade de energia). Isso transforma a manutenção em uma ferramenta de engenharia de confiabilidade e melhoria de processo.

A integração do diagnóstico técnico com a gestão da cadeia de suprimentos e estoques de manutenção (MRO) otimiza o capital de giro da empresa. Sabendo com precisão a vida útil remanescente de um componente crítico através da análise preditiva, a compra da peça de reposição pode ser disparada no modelo *just-in-time*. Isso reduz drasticamente o custo de estoque parado (*carrying cost*) de itens caros e de baixa rotatividade, liberando caixa para a organização.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

A análise termográfica de painéis elétricos e componentes mecânicos é uma ferramenta indispensável para a detecção de conexões frouxas, desequilíbrios de carga e atrito excessivo. A implementação de janelas de inspeção infravermelha nos painéis permite a realização dessas medições com o sistema energizado e fechado, garantindo a segurança do eletricitista conforme a NR-10. A correlação entre o aumento de temperatura e a carga elétrica no momento da medição é essencial para um diagnóstico correto.

Conclui-se que o diagnóstico moderno na indústria depende de uma simbiose entre a instrumentação avançada e a inteligência analítica humana. A tecnologia fornece os dados, mas é a *expertise* técnica do engenheiro ou técnico especializado que transforma esses dados em diagnósticos precisos e decisões de manutenção que evitam custos catastróficos e garantem a disponibilidade operacional.

5. Arquiteturas de automação e controle avançado para a indústria 4.0

A arquitetura do sistema de automação define a escalabilidade, a robustez e a capacidade de integração vertical da planta industrial. **Bolton (2010)** descreve a hierarquia clássica da automação (Pirâmide de Automação), desde o nível de campo (sensores e atuadores) até o nível de gestão corporativa (ERP). O *retrofit* moderno deve visar a dissolução dessas camadas rígidas, promovendo a comunicação direta entre o chão de fábrica e os sistemas de gestão. O uso de redes industriais determinísticas e abertas é fundamental para garantir a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes, evitando o nocivo "aprisionamento tecnológico" (*vendor lock-in*).

O desenvolvimento de *software* para automação industrial deve seguir padrões de engenharia de *software* rigorosos, como a norma IEC 61131-3, que define as linguagens de programação de CLPs (Ladder, Texto Estruturado, Blocos de Função). A estruturação do código em blocos funcionais reutilizáveis, encapsulados e bem documentados facilita a manutenção, a detecção de *bugs* e futuras expansões do sistema. A padronização de bibliotecas de objetos para equipamentos comuns (motores, válvulas, PIDs) acelera o desenvolvimento e uniformiza a operação em diferentes máquinas da planta.

A segurança cibernética industrial (*Cybersecurity*) tornou-se um requisito crítico de projeto na era da conectividade. Com a convergência TI/TO, os sistemas de controle industrial (ICS), antes isolados (*air-gapped*), tornaram-se alvos de ataques cibernéticos. A implementação de uma estratégia de defesa em profundidade, com segmentação de redes (VLANs), *firewalls* industriais com inspeção profunda de pacotes (DPI), controle de acesso rigoroso e gestão de *patches*, é mandatória. A automação deve ser projetada para ser segura por padrão (*Secure by Design*), protegendo a integridade e a disponibilidade do processo produtivo.

A robótica colaborativa (Cobots) e os sistemas de movimentação autônoma (AGVs/AMRs) estão redefinindo o *layout* e a flexibilidade das fábricas. A integração desses sistemas com a linha de

Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

produção exige interfaces de segurança avançadas e protocolos de comunicação robustos. O papel da engenharia de automação é orquestrar a interação segura e eficiente entre humanos e máquinas, garantindo que a tecnologia aumente a capacidade humana de produção sem introduzir novos riscos ocupacionais.

A virtualização de servidores e o uso de tecnologias de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) permitem simular alterações no processo, testar novas estratégias de controle e treinar operadores em um ambiente virtual seguro antes da implementação física. **Karnopp et al. (2012)** enfatizam a importância da modelagem matemática e da simulação no controle de sistemas mecatrônicos complexos. Isso reduz drasticamente o tempo de comissionamento e o risco de erros operacionais durante a partida da planta.

Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) modernos evoluíram para plataformas de operações unificadas, oferecendo interfaces baseadas na web (HTML5), acessíveis via dispositivos móveis. A visualização de dados deve ser intuitiva, utilizando conceitos de *High Performance HMI* (norma ISA-101) para reduzir a carga cognitiva do operador, destacando apenas as informações anormais que requerem atenção imediata, em vez de sobrecarregar a tela com gráficos coloridos e irrelevantes.

Conclui-se que a automação não é apenas a substituição do trabalho manual repetitivo, mas a criação de uma infraestrutura digital nervosa que permite o controle preciso, a rastreabilidade total e a otimização contínua dos processos físicos de transformação.

6. Segurança elétrica, conformidade normativa e gestão de riscos (nr-10 / nr-12)

A segurança em instalações elétricas e máquinas industriais é um imperativo ético, legal e financeiro. **Almeida (2018)** discute extensivamente em sua obra sobre gestão da manutenção a aplicação das Normas Regulamentadoras NR-10 e NR-12 como bases para a mitigação de riscos. A adequação a essas normas não é um evento único, mas um processo contínuo que começa com a Análise de Risco (utilizando métodos como HRN - *Hazard Rating Number*) para classificar os perigos e determinar a categoria de segurança exigida para o sistema de controle (Categoria 3 ou 4 da ISO 13849-1).

A adequação de painéis elétricos envolve a proteção contra contato direto e indireto, o dimensionamento correto de dispositivos de proteção contra curto-circuito e sobrecarga, e a seletividade da proteção. A proteção contra o arco elétrico (*Arc Flash*) é um dos aspectos mais críticos e complexos da segurança elétrica moderna. Estudos de energia incidente devem ser realizados para determinar as zonas de risco, calcular as distâncias de aproximação e especificar as vestimentas de proteção (EPs) adequadas (ATP). A engenharia deve buscar soluções que reduzam a energia incidente, como relés detectores de arco, ajustes de proteção e manutenção remota.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

Na adequação de máquinas e equipamentos à NR-12, a engenharia deve projetar proteções físicas (barreiras fixas e móveis) e dispositivos de intertravamento que impeçam o acesso às zonas de perigo. A lógica de segurança deve ser processada por dispositivos dedicados e certificados, garantindo que uma falha no sistema não leve à perda da função de segurança. A ergonomia das proteções é fundamental; se uma proteção atrapalha a produção ou a manutenção, ela será inevitavelmente burlada (*bypassed*) pelos operadores. O desafio da engenharia é criar segurança integrada à produtividade.

A cultura de segurança é construída através de treinamento técnico, procedimentos operacionais padronizados e permissões de trabalho. O gestor técnico deve promover a conscientização sobre os riscos invisíveis da eletricidade e da automação. A responsabilidade técnica (ART) sobre projetos e laudos de segurança é pessoal e intransferível, exigindo que o profissional tenha competência comprovada e ética rigorosa. O prontuário das instalações elétricas (PIE) deve ser mantido atualizado e auditável.

A gestão de bloqueio e etiquetagem (LOTO - *Lockout/Tagout*) é o procedimento administrativo mais importante para garantir a segurança durante a manutenção. A engenharia deve prever pontos de bloqueio físico em todas as fontes de energia (elétrica, pneumática, hidráulica, gravitacional) da máquina. A automação pode auxiliar indicando o estado de energia zero na IHM, mas o bloqueio físico é insubstituível.

A validação dos sistemas de segurança deve ser feita através de testes funcionais documentados, simulando falhas para garantir que o sistema reaja conforme projetado (ex: parada segura em caso de quebra de cabo de sensor). A manutenção preventiva dos componentes de segurança (testes periódicos de relés e cortinas) é obrigatória para manter a integridade do sistema ao longo do tempo.

Conclui-se que a segurança é um valor intrínseco à qualidade da engenharia. Um sistema eficiente e produtivo deve ser, antes de tudo, um sistema seguro para quem o opera e mantém. A conformidade normativa é o ponto de partida para a excelência operacional e a proteção do maior ativo da indústria: a vida humana.

7. Suporte técnico ao investimento e capacitação: o fator humano na tecnologia

A decisão de investir em modernização industrial envolve riscos financeiros e técnicos significativos em um ambiente de incerteza econômica. O suporte técnico à decisão de investimento visa fornecer análises de viabilidade técnico-econômica (EVTE) sólidas que fundamentem o CAPEX. Isso envolve o cálculo do Retorno sobre o Investimento (ROI), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e, crucialmente, a análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC - *Life Cycle Costing*). O LCC considera não apenas o custo de aquisição, mas os custos de operação, energia, manutenção e descarte ao longo de

Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

10 ou 20 anos. O consultor técnico atua como um tradutor, convertendo especificações técnicas complexas em indicadores financeiros compreensíveis para a diretoria.

A seleção de fornecedores e tecnologias deve ser baseada em critérios técnicos objetivos de desempenho, suporte pós-venda, disponibilidade de peças e interoperabilidade, evitando decisões baseadas apenas no menor preço inicial. A elaboração de especificações técnicas detalhadas (RFP - *Request for Proposal*) garante que as propostas do mercado sejam comparáveis tecnicamente (maçãs com maçãs) e atendam às necessidades reais da planta. **Groover (2011)** destaca a importância de quantificar também os benefícios intangíveis da automação, como melhoria da qualidade, segurança e flexibilidade de produção.

A capacitação da força de trabalho é o investimento complementar obrigatório e frequentemente subestimado. A introdução de novas tecnologias cria um *gap* de competências que deve ser preenchido com treinamento técnico especializado e contínuo. Workshops, treinamentos *on-the-job*, simulações e a criação de manuais de operação visuais são estratégias para garantir a apropriação da tecnologia pela equipe local. **Silva (2015)** reforça em seus textos sobre automação que a tecnologia só entrega valor se for operada e mantida corretamente por humanos competentes.

A gestão do conhecimento técnico da empresa evita que a inteligência operacional se perca com a rotatividade de pessoal (*turnover*). A documentação rigorosa de projetos *as-built*, alterações de *software* e parâmetros de processo cria uma memória técnica institucional. Sistemas de gestão da manutenção (CMMS) devem ser alimentados com dados precisos e padronizados para gerar histórico e inteligência de falhas.

A mentoria de jovens técnicos e engenheiros é uma responsabilidade dos profissionais seniores e líderes técnicos. A transferência de conhecimento tácito (experiência de campo, "macetes", intuição técnica) é tão importante quanto o conhecimento explícito (normas e manuais). O líder técnico deve fomentar um ambiente de aprendizado contínuo, curiosidade investigativa e resolução de problemas estruturada.

A gestão de projetos de modernização exige metodologias de gerenciamento (como PMBOK ou Agile) para controlar escopo, prazo, custo e qualidade. O consultor técnico deve atuar como gerente de projeto, coordenando fornecedores, equipe interna e *stakeholders*, garantindo que a execução física siga o planejado e que os desvios sejam corrigidos rapidamente.

Conclui-se que a tecnologia por si só não resolve problemas; são as pessoas capacitadas, utilizando a tecnologia correta e bem gerenciada, que geram resultados. O investimento em capital humano e em gestão técnica é o que garante o retorno do investimento em capital físico e a perenidade das operações industriais.

8. Conclusão

A análise sistemática e aprofundada apresentada neste estudo confirma que a modernização da infraestrutura industrial através do *retrofit* e da automação avançada não é uma opção, mas uma estratégia mandatória de sobrevivência e competitividade. A obsolescência dos equipamentos eletromecânicos, longe de ser apenas um passivo contábil, apresenta-se como uma oportunidade estratégica para introduzir inteligência e eficiência no chão de fábrica. O estudo demonstrou, com base em evidências teóricas e práticas, que a integração de diagnósticos avançados, automação robusta e práticas de manutenção preditiva, conforme as diretrizes de **Mobley (2014)** e **Santos (2016)**, é capaz de reverter a curva de degradação dos ativos, transformando plantas antigas em unidades operacionais competitivas.

Fica evidente que a eficiência energética é o "primeiro combustível" da indústria moderna e a forma mais barata de reduzir custos e emissões. A redução do desperdício termodinâmico e elétrico através de motores de alto rendimento, inversores de frequência e gestão ativa de carga, alinhada às normas da **IEC (2008)** e **ISO 50001 (2018)**, oferece retorno financeiro rápido e seguro. A engenharia elétrica e de automação, fundamentada em leis físicas imutáveis, fornece as ferramentas precisas para extrair esse valor oculto nos processos industriais existentes.

A importância do diagnóstico de falhas baseado em dados (*Data-Driven*) emerge como o divisor de águas na gestão moderna de ativos. A capacidade de prever falhas antes que paralise a produção muda o paradigma da manutenção de um centro de custos para um garantidor de capacidade produtiva e confiabilidade. A conectividade da Indústria 4.0 habilita essa visão, mas é a *expertise* humana na interpretação dos dados que fecha o ciclo de valor. A tecnologia é o meio; a inteligência analítica é o fim.

A segurança operacional e a conformidade com normas regulamentadoras rigorosas, como discutido por **Almeida (2018)**, não podem ser vistas como burocracia, mas como a base ética da engenharia. A modernização oferece a chance única de elevar os padrões de segurança de máquinas antigas para níveis aceitáveis, mitigando riscos legais e humanos inaceitáveis. Um ambiente seguro é um ambiente produtivo.

A competência técnica e a visão multidisciplinar do engenheiro ou tecnólogo responsável mostram-se essenciais para navegar a complexidade multidimensional desses projetos. A capacidade de transitar com fluidez entre o chão de fábrica e a sala de reuniões, traduzindo necessidades técnicas em estratégias de negócio, é o que viabiliza a aprovação e o sucesso dos projetos de *retrofit*. A experiência acumulada confere a autoridade necessária para guiar as indústrias nessa transição tecnológica.

A aplicação universal desses princípios, seja em economias emergentes ou em mercados

Ano V, v.2 2025 | **submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025**

maduros, valida a engenharia como uma disciplina global. Os desafios de produtividade e sustentabilidade são ubíquos, e as soluções baseadas em rigor técnico, normas internacionais e inovação têm aplicabilidade irrestrita. A engenharia de alta complexidade é um idioma universal de eficiência.

Conclui-se, portanto, que o futuro da indústria depende da revitalização inteligente de sua base instalada. O descarte de máquinas robustas em favor do novo nem sempre é a opção mais ecológica ou econômica. O *retrofit*, potencializado pela automação e pela análise de dados, é o caminho para uma indústria mais resiliente, eficiente e sustentável.

A relevância deste estudo reside na sistematização de uma abordagem prática para problemas complexos. Ao unir a teoria da engenharia com a realidade da manutenção industrial, oferecemos um roteiro claro para gestores e engenheiros que buscam a excelência operacional.

Em última análise, a missão da engenharia de manutenção é resolver problemas e melhorar a qualidade de vida através da tecnologia. Na indústria, isso significa produzir mais e melhor, com menos recursos e maior segurança. É uma missão contínua, técnica e estratégica.

Este artigo consolida a visão de que a modernização industrial é um imperativo estratégico, e que o domínio das tecnologias de energia e automação é a chave para desbloquear o potencial produtivo das nações no século XXI.

Referências

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Gestão da Manutenção: Aplicada a Sistemas Elétricos e de Automação**. São Paulo: Érica, 2018.

BOLTON, William. **Mecatrônica: Uma Abordagem Multidisciplinar**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

GROOVER, Mikell P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-30: Rotating electrical machines - Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code)**. Geneva: IEC, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 50001: Energy management systems — Requirements with guidance for use**. Geneva: ISO, 2018.

KARNOPP, Dean C.; MARGOLIS, Donald L.; ROSENBERG, Ronald C. **System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

MOBLEY, R. Keith. **Maintenance Engineering Handbook**. 8. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

PAREKH, R. **AC Induction Motor Fundamentals**. Microchip Technology Inc., 2003.



Ano V, v.2 2025 | submissão: 12/10/2025 | aceito: 14/10/2025 | publicação: 16/10/2025

RASHID, Muhammad H. **Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications**. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2013.

RIFKIN, Jeremy. **The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World**. New York: Palgrave Macmillan, 2011.

SANTOS, Winderson. **Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2016.

SILVA, José Claudio da. **Automação de Processos Industriais**. São Paulo: Érica, 2015.

WEG. **Guia de Eficiência Energética em Motores Elétricos**. Jaraguá do Sul: WEG, 2020.