RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

A eficiência energética na indústria começa pela equipe que opera a planta e não pela compra de equipamentos novos

Industrial energy efficiency starts with the team that operates the plant rather than with the purchase of new equipment

La eficiencia energética en la industria comienza por el equipo que opera la planta y no por la compra de equipos nuevos

Adriano Silva da Cruz Santos

Engenheiro Químico pelo Centro Universitário Jorge Amado (UNIJORGE). Técnico em Operação de Processos pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), Departamento Regional da Bahia. Membro do American Institute of Chemical Engineers (AIChE).

RESUMO

A eficiência energética industrial costuma ser associada à substituição de equipamentos e à adoção de novas tecnologias. A literatura sobre a chamada lacuna de eficiência energética demonstra, contudo, que parcela relevante do potencial de economia depende de fatores organizacionais, gerenciais e comportamentais, entre os quais a forma como as instalações são operadas e mantidas. Este artigo tem como objetivo discutir o papel das equipes de operação e manutenção na melhoria do desempenho energético de plantas de processo, com ênfase nos setores químico, petroquímico e de energia. A pesquisa adota abordagem qualitativa, baseada em revisão narrativa da literatura científica e em análise de normas técnicas e documentos de organismos internacionais. A discussão percorre as barreiras não tecnológicas à eficiência, os sistemas de gestão da energia, a melhoria contínua, a redução da variabilidade de processo, a confiabilidade dos ativos, o conhecimento tácito dos operadores e os benefícios múltiplos das medidas de eficiência. Os resultados indicam que práticas operacionais, rotinas de manutenção, competência técnica e indicadores incorporados ao trabalho cotidiano condicionam o desempenho energético tanto quanto a tecnologia instalada. Conclui-se que investimentos em equipamentos produzem resultados limitados quando não são acompanhados de gestão estruturada e de capacitação das equipes que tomam decisões operacionais diariamente.

Palavras-chave: Eficiência energética; Gestão da energia; Melhoria contínua; Confiabilidade de ativos; Indústria de processos.

ABSTRACT

Industrial energy efficiency is commonly associated with equipment replacement and the adoption of new technologies. The literature on the so-called energy efficiency gap shows, however, that a relevant share of the savings potential depends on organizational, managerial and behavioral factors, including the way facilities are operated and maintained. This article discusses the role of operations and maintenance teams in improving the energy performance of process plants, with emphasis on the chemical, petrochemical and energy sectors. The research follows a qualitative approach, based on a narrative review of the scientific literature and on the analysis of technical standards and documents from international organizations. The discussion covers non-technological barriers to efficiency, energy management systems, continuous improvement, the reduction of process variability, asset reliability, operators' tacit knowledge and the multiple benefits of efficiency measures. The findings indicate that operating practices, maintenance routines, technical competence and indicators embedded in daily work shape energy performance as much as the installed technology. The study concludes that investments in equipment yield limited results when they are not accompanied by structured management and by the training of the teams that make operational decisions every day.

Keywords: Energy efficiency; Energy management; Continuous improvement; Asset reliability; Process industry.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

1 INTRODUÇÃO

A indústria figura entre os maiores consumidores de energia do mundo, e os segmentos químico, petroquímico e de refino estão entre os mais intensivos nesse aspecto, pois dependem de grandes quantidades de calor, vapor, eletricidade e combustíveis para converter matérias-primas em produtos. Durante muito tempo, o debate sobre eficiência energética nesses setores concentrou-se em soluções tecnológicas, como motores de alto rendimento, trocadores de calor mais eficientes, sistemas de cogeração e integração térmica de processos. Abdelaziz, Saidur e Mekhilef (2011), em revisão sobre estratégias de economia de energia no setor industrial, mostraram que essas soluções convivem com medidas de natureza gerencial e de política pública, cuja contribuição para o resultado final costuma receber menos atenção do que a aquisição de novos equipamentos.

Desde o trabalho de Jaffe e Stavins (1994), a literatura econômica registra a existência de uma diferença persistente entre o potencial de eficiência energética considerado economicamente viável e aquele efetivamente realizado pelas empresas. O problema que orienta este estudo diz respeito à parcela desse potencial que não depende da compra de tecnologia, mas da maneira como as plantas são operadas, mantidas e gerenciadas no dia a dia. Backlund et al. (2012) argumentaram que a inclusão das práticas de gestão da energia amplia de modo significativo o potencial de economia, e essa constatação sustenta a hipótese de que as equipes de operação e manutenção ocupam posição decisiva no desempenho energético industrial.

O objetivo deste artigo é discutir, com base na literatura científica, em normas técnicas e em documentos de organismos internacionais, como fatores organizacionais, métodos de melhoria contínua, controle da variabilidade, confiabilidade dos ativos e conhecimento operacional influenciam a eficiência energética em plantas de processo. O texto está organizado em sete seções de desenvolvimento, que tratam das barreiras não tecnológicas, da gestão da energia, da melhoria contínua, da variabilidade de processo, da confiabilidade dos ativos, do conhecimento tácito e dos benefícios múltiplos da eficiência, seguidas da conclusão.

2 METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, e foi conduzida por meio de revisão narrativa da literatura associada à análise documental. A escolha da revisão narrativa justifica-se pela natureza interdisciplinar do tema, que mobiliza contribuições da engenharia química, da engenharia de produção, da economia da energia, da gestão da manutenção e da psicologia

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

organizacional. Esse tipo de revisão não pretende esgotar a produção científica disponível nem estimar efeitos agregados por meio de procedimentos estatísticos, mas permite reunir obras de referência, comparar seus argumentos e construir uma interpretação articulada sobre a relação entre práticas operacionais e desempenho energético em instalações industriais.

O levantamento bibliográfico considerou bases de dados de ampla cobertura na área, como Scopus, ScienceDirect e Web of Science, além das listas de referências de estudos seminais, procedimento que permitiu identificar trabalhos frequentemente citados em revisões posteriores. Foram utilizados descritores em inglês e em português, entre eles energy efficiency gap, industrial energy management, barriers to energy efficiency, continuous improvement, total productive maintenance, tacit knowledge, eficiência energética industrial e gestão da energia. Priorizaram-se artigos publicados em periódicos revisados por pares, como Energy Policy, Journal of Cleaner Production, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Energy e Journal of Operations Management, bem como livros de referência reconhecidos pela comunidade acadêmica.

A análise documental abrangeu normas técnicas e publicações de organismos governamentais e internacionais. Foram examinadas a norma ABNT NBR ISO 50001, que estabelece requisitos para sistemas de gestão da energia, a norma ISO 50006, que orienta a construção de linhas de base e indicadores de desempenho energético, o relatório da Agência Internacional de Energia sobre os benefícios múltiplos da eficiência energética e guias técnicos publicados por agências do governo dos Estados Unidos sobre sistemas de vapor e sobre a integração entre produção enxuta e energia. Esses documentos foram selecionados por sua legitimidade institucional, pela disponibilidade pública e pela influência que exercem sobre práticas adotadas na indústria.

O material reunido foi submetido a leitura analítica e organizado em categorias temáticas, a saber, as barreiras não tecnológicas à eficiência energética, os sistemas de gestão da energia, a melhoria contínua, a variabilidade de processo, a confiabilidade dos ativos, o conhecimento tácito e a automação e os benefícios múltiplos das medidas de eficiência. Reconhece-se como limitação a natureza não exaustiva da revisão narrativa, bem como a predominância de estudos realizados na Europa e na América do Norte. Parte das evidências provém de setores industriais distintos da indústria química, o que exige cautela na generalização dos resultados e indica a necessidade de estudos empíricos específicos em plantas de processo contínuo.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

3 A LACUNA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AS BARREIRAS QUE NÃO SÃO TECNOLÓGICAS

Jaffe e Stavins (1994) sistematizaram o conceito de lacuna de eficiência energética ao discutir por que tecnologias aparentemente vantajosas do ponto de vista econômico não são adotadas na extensão prevista pelas análises de engenharia. Os autores distinguiram diferentes noções de nível ótimo de eficiência, conforme se considerem apenas as falhas de mercado passíveis de correção por políticas públicas ou também fatores como custos ocultos, heterogeneidade entre consumidores e incerteza. Essa distinção mostrou que parte da lacuna pode ser explicada por elementos que os cálculos de engenharia não capturam, e abriu espaço para investigações sobre os mecanismos que impedem a realização do potencial dentro das próprias organizações.

Sorrell et al. (2004) aprofundaram essa discussão em estudo sobre as barreiras ao investimento em eficiência energética em organizações europeias. Os autores propuseram uma classificação que inclui risco, informação imperfeita, custos ocultos, acesso a capital, incentivos divididos e racionalidade limitada, e examinaram o problema a partir de três perspectivas teóricas complementares, a econômica, a comportamental e a organizacional. A contribuição central do estudo foi demonstrar que as barreiras não atuam de forma isolada e que fatores como a posição da energia na estrutura de poder da empresa, a atenção gerencial disponível e as rotinas estabelecidas influenciam as decisões tanto quanto a rentabilidade calculada dos projetos.

Cagno et al. (2013) propuseram uma taxonomia que distingue barreiras externas, associadas ao mercado, aos fornecedores, ao governo e às instituições financeiras, de barreiras internas, classificadas como econômicas, comportamentais, organizacionais, de competência e de consciência. A separação entre esses grupos têm valor prático, pois indica que muitas das dificuldades enfrentadas pelas empresas estão sob seu próprio controle. Trianni e Cagno (2012), em estudo empírico com pequenas e médias empresas industriais, evidenciaram que a percepção das barreiras varia conforme as características das empresas e que, além do acesso a capital, fatores ligados à informação e às competências técnicas internas influenciam a identificação e a implementação de oportunidades de eficiência.

Fleiter, Worrell e Eichhammer (2011) examinaram a forma como os modelos de demanda de energia industrial do tipo bottom-up representam as barreiras à eficiência. Os autores constataram que esses modelos, amplamente utilizados para estimar potenciais de economia e orientar políticas públicas, tendem a tratar as barreiras de forma simplificada, frequentemente por meio de taxas de desconto elevadas ou de restrições genéricas à difusão tecnológica. Essa simplificação leva a estimativas que

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

descrevem o que seria tecnicamente possível, mas pouco informam sobre as condições organizacionais necessárias para que o potencial se concretize, o que reforça a importância de compreender os processos internos das empresas.

Backlund et al. (2012) avançaram nesse debate ao propor o conceito de lacuna estendida de eficiência energética. Os autores argumentaram que as análises tradicionais consideram principalmente a adoção de tecnologias eficientes, ao passo que a inclusão de práticas de gestão da energia, como o acompanhamento sistemático do consumo, a definição de responsabilidades e a mudança de rotinas operacionais, revela um potencial adicional significativo. Essa formulação desloca parte da atenção do equipamento para as pessoas e os processos de trabalho, e sustenta a tese de que uma fração relevante da eficiência energética industrial depende da maneira como as instalações são conduzidas no cotidiano.

4 GESTÃO DA ENERGIA COMO PRÁTICA ORGANIZACIONAL

A norma ABNT NBR ISO 50001 estabelece requisitos para que organizações implementem, mantenham e melhorem sistemas de gestão da energia, com base no ciclo de planejar, executar, verificar e agir (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018). Entre seus elementos estão a revisão energética, a identificação dos usos significativos de energia, a definição de indicadores de desempenho energético e de linhas de base e o estabelecimento de objetivos e metas. A norma exige ainda que as pessoas cujo trabalho afeta o desempenho energético sejam competentes e conscientes do impacto de suas atividades, requisito que reconhece formalmente o papel das equipes operacionais no resultado obtido.

A norma ISO 50006 complementa esse arcabouço ao orientar a construção de linhas de base e de indicadores de desempenho energético (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2014). O documento enfatiza a necessidade de normalizar o consumo em função das variáveis relevantes que o influenciam, como o volume de produção, as condições climáticas e as características da matéria-prima, de modo que as comparações ao longo do tempo reflitam mudanças reais de desempenho e não apenas variações de carga. Essa orientação tem implicação direta para a operação, pois indicadores mal construídos podem atribuir à equipe ganhos ou perdas que resultam de fatores externos à sua atuação.

Schulze et al. (2016) realizaram revisão sistemática da literatura sobre gestão da energia na indústria e propuseram um modelo conceitual integrador composto por cinco elementos, a saber, estratégia e planejamento, implementação e operação, controle, organização e cultura. Ao incluir a organização

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

e a cultura entre os elementos do modelo, ao lado das dimensões técnicas e de controle, os autores reconheceram que o desempenho energético depende também de estruturas de responsabilidade e de valores compartilhados pelos colaboradores. Essa formulação é relevante porque indica que a existência de procedimentos formais não garante, por si só, que o desempenho energético seja incorporado às decisões cotidianas de quem opera os sistemas consumidores de energia.

Palm e Thollander (2010) defenderam uma perspectiva interdisciplinar para o estudo da eficiência energética industrial, ao argumentar que abordagens exclusivamente técnicas ou econômicas não explicam por que empresas com condições semelhantes apresentam resultados tão distintos. Em obra posterior, Thollander e Palm (2013) reuniram evidências sobre auditorias energéticas, gestão da energia e programas públicos, e mostraram que a continuidade dos resultados depende de estruturas organizacionais que atribuam responsabilidade pela energia, de rotinas de acompanhamento e de comprometimento da alta gestão. Na ausência desses elementos, as economias obtidas em auditorias tendem a se dissipar com o tempo.

A síntese dessas contribuições permite compreender a gestão da energia como prática organizacional e não apenas como conjunto de projetos de engenharia. Em plantas de processo, grande parte das variáveis que determinam o consumo, como temperaturas de operação, razões de refluxo, excesso de ar em fornos, pressões de vapor e alinhamentos de equipamentos, é ajustada continuamente pelas equipes de turno. A norma ABNT NBR ISO 50001 e o modelo de Schulze et al. (2016) convergem ao indicar que a eficiência só se torna sustentável quando essas decisões são orientadas por indicadores compreensíveis, metas claras e retorno de informação sobre o efeito de cada ação no desempenho energético.

5 MELHORIA CONTÍNUA E O COMBATE ÀS PERDAS INVISÍVEIS

As bases da melhoria contínua remontam ao trabalho de Shewhart (1939), que propôs um ciclo de especificação, produção e inspeção como processo científico de aprendizagem aplicado à qualidade, posteriormente difundido como ciclo de planejar, executar, verificar e agir. Deming (1986) ampliou essa formulação e sustentou que a maior parte dos problemas de desempenho decorre do sistema de trabalho, cuja responsabilidade pertence à gestão, e não da conduta individual dos trabalhadores. Para o autor, melhorar resultados exige compreender a variação presente nos processos e criar condições para que as pessoas que neles atuam contribuam com conhecimento e iniciativa, princípio que se aplica diretamente ao uso da energia.

Imai (1986) popularizou o conceito de kaizen, entendido como melhoria gradual, contínua e

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

envolvendo todos os níveis da organização, em contraste com estratégias baseadas exclusivamente em grandes inovações tecnológicas. Bessant, Caffyn e Gallagher (2001) investigaram como a capacidade de melhoria contínua se desenvolve nas empresas e propuseram um modelo evolutivo no qual essa capacidade é construída progressivamente, por meio da aprendizagem e da consolidação de rotinas comportamentais específicas. Os autores mostraram que a melhoria contínua não surge espontaneamente da adoção de ferramentas, pois depende de práticas que precisam ser cultivadas, reforçadas e integradas à estratégia da organização ao longo do tempo.

O sistema Toyota de produção, descrito por Ohno (1997), organizou a eliminação de desperdícios em torno de categorias como superprodução, espera, transporte, processamento excessivo, estoques, movimentação e defeitos. Womack e Jones (1996) sintetizaram essa experiência nos princípios do pensamento enxuto, centrados na definição de valor, no mapeamento do fluxo, na produção puxada e na busca da perfeição. Liker (2004) destacou que o êxito desse modelo depende de princípios como a observação direta do local onde o trabalho acontece e o desenvolvimento das pessoas, o que confere às equipes de linha de frente papel ativo na identificação de perdas e na proposição de soluções.

A energia não figura explicitamente entre as categorias clássicas de desperdício do pensamento enxuto, embora esteja embutida em quase todas elas. O guia publicado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos sobre a integração entre produção enxuta e energia observa que iniciativas de melhoria tradicionais frequentemente geram economias de energia, mas que a atenção explícita ao consumo energético permite obter ganhos substancialmente maiores (ESTADOS UNIDOS, 2007). O documento propõe que o uso de energia seja incorporado ao mapeamento do fluxo de valor e aos eventos de melhoria, de modo que as equipes passem a reconhecer o consumo desnecessário como perda passível de eliminação.

A transposição desses métodos para a indústria de processos contínuos exige adaptação, pois eles foram concebidos em contextos de manufatura discreta. Em plantas químicas e petroquímicas, as perdas energéticas assumem formas específicas, como vapor liberado por purgadores com defeito, isolamento térmico danificado, excesso de ar na combustão, aquecimento acima do necessário e operação de equipamentos sem demanda correspondente. O guia do Departamento de Energia dos Estados Unidos sobre sistemas de vapor descreve várias dessas oportunidades e enfatiza que muitas delas podem ser capturadas por meio de inspeção periódica, ajustes operacionais e manutenção adequada, sem necessidade de investimentos expressivos em novos equipamentos (ESTADOS UNIDOS, 2012).

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

6 VARIABILIDADE DE PROCESSO, SEIS SIGMA E CONTROLE AVANÇADO

A compreensão da variabilidade constitui um dos fundamentos do controle estatístico de processos. Shewhart (1939) distinguiu as causas comuns de variação, inerentes ao sistema, das causas especiais, associadas a eventos identificáveis, e essa distinção permanece central na literatura contemporânea. Montgomery (2013) mostra que os gráficos de controle e as análises de capacidade permitem diferenciar essas duas fontes e orientar a ação corretiva adequada a cada uma. Em processos químicos, a variabilidade de temperatura, pressão, composição e vazão afeta não apenas a qualidade do produto, mas também a quantidade de energia necessária para manter a operação dentro das especificações.

A metodologia Seis Sigma, desenvolvida na Motorola e difundida por empresas como a General Electric, foi descrita por Harry e Schroeder (2000) como estratégia gerencial orientada à redução de defeitos e da variação nos processos. Seu roteiro mais conhecido organiza os projetos nas etapas de definir, medir, analisar, melhorar e controlar. Schroeder et al. (2008) analisaram a base teórica do método e o definiram como uma estrutura organizada, paralela à hierarquia formal, destinada a reduzir a variação nos processos por meio de especialistas em melhoria, de um método estruturado e de métricas de desempenho, com o objetivo de alcançar metas estratégicas da organização.

Linderman et al. (2003) examinaram o Seis Sigma à luz da teoria do estabelecimento de metas e argumentaram que a combinação entre metas específicas e desafiadoras e um método estruturado de solução de problemas explica parte da eficácia observada. Os autores ressaltaram que metas muito ambiciosas, quando desacompanhadas de método e de capacitação, podem gerar frustração e comportamentos indesejados. Essa observação tem relevância para a gestão da energia, pois metas de redução de consumo estabelecidas sem que as equipes disponham de ferramentas de análise e de autonomia para atuar sobre as variáveis de processo tendem a produzir resultados pouco consistentes.

O controle avançado de processos oferece outra via para reduzir a variabilidade. Bauer e Craig (2008) realizaram levantamento junto a usuários e fornecedores dessa tecnologia e propuseram um referencial para avaliação de seus benefícios econômicos. O mecanismo central descrito na literatura consiste em reduzir a dispersão das variáveis controladas, o que permite deslocar o ponto médio de operação para mais perto das restrições do processo sem aumentar o risco de violá-las. Entre os benefícios associados a esse deslocamento estão o aumento de capacidade, a melhoria de rendimento e a redução do consumo de energia, resultados que dependem tanto do desempenho dos controladores quanto da sua aceitação pelas equipes de operação.

A relação entre variabilidade e consumo de energia manifesta-se de forma particularmente clara nas margens de segurança operacional adotadas pelas equipes. Quando o processo oscila, os operadores

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

tendem a manter as variáveis afastadas dos limites de especificação, por meio de purificação além do exigido, temperaturas de aquecimento mais elevadas ou maior vazão de utilidades, de modo a evitar produtos fora de especificação. Essas margens consomem energia de forma contínua e raramente aparecem nos indicadores como perda. A redução da variabilidade, seja por métodos estatísticos, por controle avançado ou por padronização de procedimentos, permite estreitar essas margens com segurança e converte a disciplina operacional em economia de energia mensurável.

7 CONFIABILIDADE DOS ATIVOS E MANUTENÇÃO COMO FONTES DE EFICIÊNCIA

Nakajima (1988) apresentou a manutenção produtiva total como sistema voltado à maximização da eficácia dos equipamentos, com a participação de todos os níveis da organização. O autor propôs a eficácia global do equipamento como indicador que combina disponibilidade, desempenho e qualidade, e identificou seis grandes perdas, entre elas as quebras, as perdas de preparação e ajuste, as pequenas paradas, a redução de velocidade, os defeitos e as perdas de partida. Cada uma dessas perdas possui contrapartida energética, pois equipamentos parados, operando em ritmo reduzido ou gerando produto fora de especificação continuam a consumir energia sem produzir valor correspondente.

Um dos pilares da manutenção produtiva total é a manutenção autônoma, na qual os operadores assumem atividades básicas de limpeza, inspeção, lubrificação e ajuste dos equipamentos que conduzem (NAKAJIMA, 1988). A proposta parte do princípio de que quem opera o equipamento diariamente está em melhor posição para perceber alterações sutis de ruído, vibração, temperatura e vazamentos. Essa proximidade permite detectar anomalias em estágio inicial, antes que evoluam para falhas funcionais. Do ponto de vista energético, a detecção precoce evita que perdas como vazamentos de vapor, aquecimento anormal de mancais e degradação de isolamentos se prolonguem por semanas ou meses sem registro.

Moubray (1997) sistematizou a manutenção centrada em confiabilidade, abordagem que parte das funções requeridas de cada ativo para identificar seus modos de falha, as consequências dessas falhas e as tarefas de manutenção tecnicamente adequadas. O autor descreveu o intervalo entre o momento em que uma falha potencial se torna detectável e aquele em que ela se converte em falha funcional, conceito que fundamenta a manutenção baseada em condição. Esse intervalo é especialmente relevante para a eficiência energética, porque muitos equipamentos continuam operando durante a degradação, com rendimento progressivamente menor, sem que a perda seja percebida pelos

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

indicadores tradicionais de disponibilidade.

A incrustação em trocadores de calor ilustra essa relação de forma exemplar. Macchietto et al. (2011) apontaram a incrustação nas baterias de pré-aquecimento de petróleo das refinarias como causa importante de ineficiência energética e observaram que os métodos convencionais de projeto se limitavam a acomodar a incrustação, em vez de preveni-la. A metodologia de integração térmica proposta por Linnhoff e Hindmarsh (1983) e detalhada por Kemp (2007) permite projetar redes de trocadores que maximizam a recuperação de calor, mas o benefício obtido no projeto depende da manutenção do desempenho térmico ao longo da operação, o que exige monitoramento e planejamento das limpezas.

Os sistemas de utilidades oferecem outros exemplos de perdas associadas à condição dos equipamentos. O guia do Departamento de Energia dos Estados Unidos sobre sistemas de vapor recomenda programas regulares de inspeção de purgadores, reparo de vazamentos, recuperação de condensado, manutenção do isolamento térmico e ajuste da combustão em caldeiras (ESTADOS UNIDOS, 2012). Saidur (2010), em revisão sobre motores elétricos, mostrou que esses equipamentos respondem por parcela expressiva do consumo de eletricidade industrial e que a operação fora do ponto adequado, o sobredimensionamento e a ausência de controle de velocidade elevam as perdas. O Quadro 1 sintetiza essas relações entre mecanismos de perda e práticas de operação e manutenção.

Quadro 1 – Mecanismos de perda energética associados à operação e à manutenção em plantas de processo

Sistema	Mecanismo de perda	Prática de operação ou manutenção	Referência
Trocadores de calor	Incrustação reduz a recuperação de calor e aumenta a carga de fornos	Monitoramento do desempenho térmico e planejamento de limpezas	Macchietto et al. (2011) e Kemp (2007)
Sistemas de vapor	Purgadores com falha, vazamentos e isolamento danificado	Inspeção periódica, reparo de vazamentos e recuperação de condensado	Estados Unidos (2012)
Fornos e caldeiras	Ajuste inadequado da combustão	Monitoramento e ajuste da relação ar e combustível	Estados Unidos (2012)
Motores, bombas e ventiladores	Operação fora do ponto adequado e sobredimensionamento	Revisão das condições de operação e controle de velocidade	Saidur (2010)
Controle de processo	Margens operacionais amplas para compensar a variabilidade	Redução da variabilidade e operação próxima às restrições	Bauer e Craig (2008)

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

Sistema	Mecanismo de perda	Prática de operação ou manutenção	Referência
Equipamentos em geral	Quebras, pequenas paradas, partidas e redução de ritmo	Manutenção autônoma e detecção precoce de anomalias	Nakajima (1988)

Fonte: elaborado pelo autor com base nas referências indicadas.

8 CONHECIMENTO TÁCITO, COMPETÊNCIA OPERACIONAL E OS PARADOXOS DA AUTOMAÇÃO

Polanyi (1966) formulou a noção de conhecimento tácito ao afirmar que as pessoas sabem mais do que conseguem expressar. Esse tipo de conhecimento, construído pela experiência e pela prática, inclui a capacidade de reconhecer padrões, interpretar sinais ambíguos e agir com base em percepções difíceis de formalizar. Em plantas de processo, o conhecimento tácito manifesta-se na forma como operadores experientes antecipam o comportamento de colunas de destilação, fornos e compressores diante de mudanças de carga, de matéria-prima ou de condições ambientais, e esse saber influencia diretamente a eficiência com que a energia é utilizada em cada momento da operação.

Nonaka e Takeuchi (1995) propuseram um modelo de criação do conhecimento organizacional baseado na conversão contínua entre conhecimento tácito e explícito, em quatro modos denominados socialização, externalização, combinação e internalização. Os autores sustentaram que a vantagem competitiva das empresas depende da capacidade de mobilizar o conhecimento tácito dos indivíduos e convertê-lo em conhecimento compartilhado. No contexto da eficiência energética, esse processo corresponde à transformação de boas práticas individuais de operação em procedimentos, parâmetros de referência e materiais de capacitação, de modo que o desempenho não dependa exclusivamente da experiência de quem está de turno.

Rasmussen (1983) distinguiu três níveis de desempenho humano em sistemas técnicos, baseados em habilidades, em regras e em conhecimento. O comportamento baseado em habilidades corresponde a ações automatizadas, o baseado em regras envolve a aplicação de procedimentos conhecidos a situações reconhecidas e o baseado em conhecimento é mobilizado diante de situações novas, que exigem raciocínio analítico. A otimização energética de uma unidade de processo frequentemente pertence a este último nível, pois envolve compreender interações entre variáveis, avaliar compromissos entre consumo, rendimento e qualidade e decidir em condições que nenhum procedimento descreve integralmente.

Bainbridge (1983) descreveu as ironias da automação ao observar que a automatização de tarefas rotineiras tende a deixar para o operador humano justamente as situações mais difíceis, ao mesmo

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

tempo em que reduz as oportunidades de praticar as habilidades necessárias para enfrentá-las. A autora argumentou que operadores que apenas monitoram sistemas automatizados perdem gradualmente a compreensão detalhada do processo. Essa constatação tem implicações para a eficiência energética, pois sistemas de controle e otimização dependem de operadores capazes de avaliar se as ações automáticas fazem sentido, identificar quando os controladores estão operando fora de suas premissas e intervir de forma adequada.

A articulação entre essas contribuições indica que a competência operacional constitui recurso estratégico para o desempenho energético, e não apenas requisito de segurança ou de qualidade. A exigência de competência e conscientização presente na norma ABNT NBR ISO 50001 encontra fundamento teórico nesses estudos, que mostram que o conhecimento necessário para operar eficientemente uma planta é em grande parte construído na prática e precisa ser deliberadamente compartilhado. Programas de capacitação que combinem fundamentos de termodinâmica e de operações unitárias com análise de casos reais da própria instalação tendem a favorecer essa conversão do saber individual em capacidade organizacional.

9 BENEFÍCIOS MÚLTIPLOS E O COMPORTAMENTO NO AMBIENTE DE TRABALHO

Worrell et al. (2003) analisaram mais de 70 estudos de caso industriais e constataram que as medidas de eficiência energética frequentemente geram benefícios que vão além da economia de energia, como aumento de produtividade, redução de custos de manutenção, melhoria da qualidade do produto, diminuição de resíduos e melhores condições de trabalho. Os autores demonstraram que, no caso da indústria siderúrgica dos Estados Unidos, a inclusão desses benefícios na modelagem dobraria o potencial de eficiência considerado economicamente viável em comparação com uma análise restrita ao valor da energia economizada. Essa constatação altera a forma como os projetos de eficiência devem ser avaliados.

A Agência Internacional de Energia consolidou essa perspectiva em relatório dedicado aos benefícios múltiplos da eficiência energética, que abrange efeitos sobre a economia, a saúde, a segurança energética e a competitividade industrial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014). O documento registra que, quando os benefícios de produtividade e operacionais foram incorporados à análise de investimentos em eficiência na indústria, o período de retorno das medidas caiu de 4,2 para 1,9 anos. Essa diferença indica que a avaliação baseada apenas na economia de energia subestima sistematicamente o valor das melhorias, inclusive daquelas que dependem predominantemente de mudanças operacionais e de manutenção.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

O comportamento das pessoas no ambiente de trabalho constitui outra dimensão relevante. Lo, Peters e Kok (2012) revisaram estudos sobre os determinantes de comportamentos pró-ambientais em organizações e sobre as intervenções destinadas a promovê-los, incluindo ações voltadas à economia de energia. Os autores identificaram que fatores como atitudes, normas sociais, hábitos e percepção de controle influenciam esses comportamentos, e observaram que a base empírica sobre intervenções em contextos organizacionais era ainda limitada e metodologicamente heterogênea, o que recomenda cautela na generalização de resultados obtidos em estudos isolados.

Carrico e Riemer (2011) avaliaram, em estudo de campo realizado em ambiente de trabalho, os efeitos de duas estratégias de incentivo à conservação de energia, o retorno de informação sobre o consumo em nível de grupo e a educação conduzida por colegas. Os resultados indicaram reduções no consumo em comparação com as condições de controle, o que sugere que a visibilidade do desempenho coletivo e a influência entre pares podem mobilizar mudanças de comportamento. Embora o estudo tenha sido realizado em edifícios administrativos, seus princípios dialogam com a lógica dos indicadores de turno e das rotinas de acompanhamento adotadas em plantas industriais.

A transposição desses achados para a indústria de processos exige considerar que o comportamento energeticamente relevante dos operadores está menos ligado a hábitos individuais, como desligar luzes ou equipamentos de escritório, e mais associado a decisões técnicas sobre a condução do processo. Ainda assim, os mecanismos identificados na literatura, como a visibilidade dos resultados, o retorno de informação e as normas compartilhadas pelo grupo, aplicam-se a esse contexto. Indicadores de desempenho energético apresentados por turno, discutidos nas passagens de serviço e associados a metas compreensíveis tendem a tornar o consumo de energia uma variável de processo tão acompanhada quanto a produção e a qualidade.

10 CONCLUSÃO

A análise desenvolvida neste artigo permite afirmar que a eficiência energética industrial não pode ser reduzida à substituição de equipamentos. A literatura sobre a lacuna de eficiência energética, iniciada por Jaffe e Stavins e aprofundada por estudos posteriores, mostra que uma parcela relevante do potencial de economia permanece sem aproveitamento por razões que não são tecnológicas, mas organizacionais, gerenciais e comportamentais, muitas delas sob controle direto das próprias empresas.

As taxonomias de barreiras examinadas evidenciam que a falta de informação, de competências internas e de atenção gerencial limita a realização do potencial com a mesma intensidade que as

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

restrições de capital. A proposta de lacuna estendida reforça essa leitura ao demonstrar que práticas de gestão da energia ampliam o potencial de economia para além do que seria obtido apenas com tecnologia, o que coloca as rotinas de trabalho e as pessoas que as executam no centro da discussão.

Os sistemas de gestão da energia oferecem a estrutura necessária para transformar a eficiência em prática permanente. A norma ABNT NBR ISO 50001 e a norma ISO 50006 estabelecem indicadores, linhas de base e requisitos de competência que reconhecem formalmente o papel das equipes. O modelo de Schulze et al., ao incluir a cultura entre seus elementos, indica, contudo, que procedimentos formais não bastam quando não há envolvimento efetivo dos colaboradores, condição necessária para que esses sistemas influenciem as decisões cotidianas.

Os métodos de melhoria contínua, do ciclo proposto por Shewhart às práticas do sistema Toyota de produção, fornecem instrumentos para identificar e eliminar perdas energéticas que raramente aparecem nos indicadores tradicionais. A experiência documentada pela agência ambiental norte-americana indica que a atenção explícita à energia amplia os ganhos dessas iniciativas, desde que os métodos sejam adaptados às características da indústria de processos contínuos e às formas específicas que o desperdício assume nesse ambiente.

A redução da variabilidade de processo revelou-se um elo importante entre qualidade, produtividade e consumo de energia. Margens operacionais amplas, adotadas para compensar oscilações, consomem energia de forma contínua e silenciosa. Métodos estatísticos, projetos estruturados de melhoria e controle avançado permitem estreitar essas margens com segurança, mas seus resultados dependem de metas bem definidas, de capacitação adequada e da aceitação das equipes que convivem diariamente com os sistemas de controle.

A confiabilidade dos ativos e a qualidade da manutenção condicionam a preservação do desempenho energético obtido no projeto. Incrustação em trocadores, falhas em purgadores, combustão desajustada e equipamentos operando fora do ponto adequado representam perdas que se acumulam ao longo do tempo. A manutenção autônoma e a manutenção baseada em condição atribuem aos operadores papel central na detecção precoce dessas perdas, antes que se convertam em falhas ou em consumo excessivo prolongado.

O conhecimento tácito dos operadores e os paradoxos da automação mostram que a tecnologia, isoladamente, não garante a operação eficiente. Sistemas de controle cada vez mais sofisticados exigem operadores capazes de compreender o processo em profundidade, avaliar a adequação das ações automáticas e intervir em situações imprevistas. A conversão desse conhecimento individual em procedimentos, parâmetros de referência e programas de capacitação constitui condição para que o desempenho energético não dependa da experiência de poucas pessoas.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

Por fim, a consideração dos benefícios múltiplos demonstra que a avaliação de medidas de eficiência baseada apenas no valor da energia economizada subestima seu retorno real, sobretudo no caso de melhorias operacionais e de manutenção. Conclui-se que investimentos em equipamentos produzem resultados limitados quando não são acompanhados de gestão estruturada, indicadores incorporados à rotina e capacitação das equipes. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a realização de estudos empíricos em plantas químicas e petroquímicas que quantifiquem a contribuição relativa das práticas operacionais e das soluções tecnológicas para o desempenho energético.

REFERÊNCIAS

ABDELAZIZ, E. A.; SAIDUR, R.; MEKHILEF, S. A review on energy saving strategies in industrial sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 150-168, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 50001**: sistemas de gestão da energia, requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BACKLUND, S. et al. Extending the energy efficiency gap. **Energy Policy**, v. 51, p. 392-396, 2012.

BAINBRIDGE, L. Ironies of automation. **Automatica**, v. 19, n. 6, p. 775-779, 1983.

BAUER, M.; CRAIG, I. K. Economic assessment of advanced process control: a survey and framework. **Journal of Process Control**, v. 18, n. 1, p. 2-18, 2008.

BESSANT, J.; CAFFYN, S.; GALLAGHER, M. An evolutionary model of continuous improvement behaviour. **Technovation**, v. 21, n. 2, p. 67-77, 2001.

CAGNO, E. et al. A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 290-308, 2013.

CARRICO, A. R.; RIEMER, M. Motivating energy conservation in the workplace: an evaluation of the use of group-level feedback and peer education. **Journal of Environmental Psychology**, v. 31, n. 1, p. 1-13, 2011.

DEMING, W. E. **Out of the crisis**. Cambridge, MA: MIT Center for Advanced Engineering Study, 1986.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **The lean and energy toolkit**. Washington, DC: EPA, 2007.

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy. **Improving steam system performance**: a sourcebook for industry. 2. ed. Washington, DC: DOE, 2012.

FLEITER, T.; WORRELL, E.; EICHHAMMER, W. Barriers to energy efficiency in industrial bottom-up energy demand models: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3099-3111, 2011.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

HARRY, M.; SCHROEDER, R. **Six Sigma**: the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations. New York: Currency, 2000.

IMAI, M. **Kaizen**: the key to Japan's competitive success. New York: Random House, 1986.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Capturing the multiple benefits of energy efficiency**. Paris: OECD/IEA, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 50006**: energy management systems, measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI), general principles and guidance. Geneva: ISO, 2014.

JAFFE, A. B.; STAVINS, R. N. The energy-efficiency gap: what does it mean? **Energy Policy**, v. 22, n. 10, p. 804-810, 1994.

KEMP, I. C. **Pinch analysis and process integration**: a user guide on process integration for the efficient use of energy. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.

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

LINDERMAN, K. et al. Six Sigma: a goal-theoretic perspective. **Journal of Operations Management**, v. 21, n. 2, p. 193-203, 2003.

LINNHOFF, B.; HINDMARSH, E. The pinch design method for heat exchanger networks. **Chemical Engineering Science**, v. 38, n. 5, p. 745-763, 1983.

LO, S. H.; PETERS, G.-J. Y.; KOK, G. A review of determinants of and interventions for proenvironmental behaviors in organizations. **Journal of Applied Social Psychology**, v. 42, n. 12, p. 2933-2967, 2012.

MACCHIETTO, S. et al. Fouling in crude oil preheat trains: a systematic solution to an old problem. **Heat Transfer Engineering**, v. 32, n. 3-4, p. 197-215, 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2013.

MOUBRAY, J. **Reliability-centred maintenance**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM**: total productive maintenance. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988.

NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. **The knowledge-creating company**: how Japanese companies create the dynamics of innovation. New York: Oxford University Press, 1995.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção**: além da produção em larga escala. Porto Alegre: Bookman, 1997.

PALM, J.; THOLLANDER, P. An interdisciplinary perspective on industrial energy efficiency. **Applied Energy**, v. 87, n. 10, p. 3255-3261, 2010.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.2 2026 | submissão: 26/10/2026 | aceito: 31/10/2026 | publicação: 05/11/2026

POLANYI, M. **The tacit dimension**. Garden City: Doubleday, 1966.

RASMUSSEN, J. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. SMC-13, n. 3, p. 257-266, 1983.

SAIDUR, R. A review on electrical motors energy use and energy savings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 877-898, 2010.

SCHROEDER, R. G. et al. Six Sigma: definition and underlying theory. **Journal of Operations Management**, v. 26, n. 4, p. 536-554, 2008.

SCHULZE, M. et al. Energy management in industry: a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3692-3708, 2016.

SHEWHART, W. A. **Statistical method from the viewpoint of quality control**. Washington, DC: Graduate School of the Department of Agriculture, 1939.

SORRELL, S. et al. **The economics of energy efficiency**: barriers to cost-effective investment. Cheltenham: Edward Elgar, 2004.

THOLLANDER, P.; PALM, J. **Improving energy efficiency in industrial energy systems**: an interdisciplinary perspective on barriers, energy audits, energy management, policies, and programs. London: Springer, 2013.

TRIANNI, A.; CAGNO, E. Dealing with barriers to energy efficiency and SMEs: some empirical evidences. **Energy**, v. 37, n. 1, p. 494-504, 2012.

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

WORRELL, E. et al. Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. **Energy**, v. 28, n. 11, p. 1081-1098, 2003.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.