



Diretrizes para a Eficiência Energética Industrial no Contexto da Transformação Digital

Guidelines for Industrial Energy Efficiency in the Context of Digital Transformation

Amanda Midori Matsumoto Brito Santos

Kleber Rocha de Oliveira

José Francisco Resende da Silva

Simone das Graças Domingues Prado

Roberta Spolon

Resumo: Este estudo tem como objetivo principal demonstrar o papel das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 na promoção da eficiência energética no contexto industrial, propondo diretrizes estratégicas que orientem a transição para modelos produtivos mais sustentáveis, inteligentes e competitivos. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa baseada em estudo multicase, abrangendo a análise de nove experiências industriais que implementaram tecnologias digitais voltadas à otimização do consumo energético. A investigação fundamenta-se em revisão bibliográfica e análise documental, complementadas pela elaboração de um roadmap de eficiência energética que integra aspectos tecnológicos, gerenciais e sustentáveis. As tecnologias habilitadoras identificadas - Internet das Coisas (IoT), Big Data Analytics, Inteligência Artificial (IA), Computação em Nuvem, Machine-to-Machine (M2M), RFID e Manufatura Digital - demonstraram alto potencial para o monitoramento, controle e automação inteligente dos processos energéticos, resultando em ganhos de produtividade, redução de desperdícios e mitigação de impactos ambientais. Os resultados evidenciam que a adoção dessas tecnologias moderniza o parque industrial e redefine os paradigmas de sustentabilidade e governança energética, contribuindo diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 9, 12 e 13). A pesquisa conclui que a transformação digital é um caminho irreversível e estratégico para a descarbonização e a competitividade industrial no século XXI. O estudo propõe, ainda, diretrizes que contemplam etapas como avaliação inicial, identificação e priorização tecnológica, desenvolvimento e implementação, monitoramento e capacitação, e comunicação e relatórios de desempenho, consolidando um modelo metodológico aplicável a diferentes setores industriais. Como perspectivas futuras, recomenda-se o aprofundamento dos estudos sobre indicadores inteligentes de desempenho energético, o uso de blockchain para rastreabilidade de energia limpa e a integração entre políticas públicas e iniciativas empresariais voltadas à digitalização sustentável.

Palavras-chave: eficiência energética; indústria 4.0; tecnologias habilitadoras; sustentabilidade; transformação digital.

Abstract: This study aims to demonstrate the role of Industry 4.0 enabling technologies in promoting energy efficiency within the industrial context, proposing strategic guidelines to support the transition toward more sustainable, intelligent, and competitive production models. The research adopts a qualitative multi-case study approach, encompassing the analysis of nine industrial experiences that implemented digital technologies focused on optimizing energy consumption. The investigation is grounded in a literature review and documentary analysis, complemented by the development of an energy efficiency roadmap that integrates technological, managerial, and sustainability aspects. The enabling technologies identified

- Internet of Things (IoT), Big Data Analytics, Artificial Intelligence (AI), Cloud Computing, Machine-to-Machine (M2M) communication, RFID, and Digital Manufacturing - demonstrated high potential for the monitoring, control, and intelligent automation of energy processes, resulting in productivity gains, waste reduction, and mitigation of environmental impacts. The results show that the adoption of these technologies modernizes the industrial sector and redefines the paradigms of sustainability and energy governance, directly contributing to the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs 7, 9, 12, and 13). The research concludes that digital transformation represents an irreversible and strategic path toward decarbonization and industrial competitiveness in the twenty-first century. The study also proposes guidelines encompassing initial assessment, technology identification and prioritization, development and implementation, monitoring and capacity building, and communication and performance reporting, consolidating a methodological model applicable to different industrial sectors. As future perspectives, further studies are recommended on smart energy performance indicators, the use of blockchain for clean energy traceability, and the integration between public policies and business initiatives aimed at sustainable digitalization.

Keywords: energy efficiency; industry 4.0; enabling technologies; sustainability; digital transformation.

INTRODUÇÃO

A globalização e o avanço das tecnologias digitais têm configurado uma nova realidade produtiva, caracterizada por cenários dinâmicos, competitivos e em constante transformação. Nesse contexto, as organizações enfrentam desafios crescentes impostos pelo surgimento contínuo de tecnologias emergentes, pela necessidade de elevar a produtividade com menores custos e pela crescente exigência de consumidores mais conscientes e participativos em toda a cadeia de valor.

Nas últimas décadas, a eficiência energética consolidou-se como uma das principais estratégias para enfrentar desafios globais contemporâneos, como as mudanças climáticas, a segurança energética (Yergin, 2012), a competitividade industrial e a promoção do desenvolvimento sustentável. Trata-se de um eixo fundamental da transição energética, capaz de reduzir o consumo de recursos naturais, diminuir emissões de gases de efeito estufa e fomentar a inovação tecnológica.

A eficiência energética também possui relevante dimensão social. Um exemplo emblemático está na disseminação de fogões domésticos energeticamente eficientes, que demandam menor quantidade de lenha e reduzem substancialmente os efeitos da poluição do ar em ambientes internos. Essa tecnologia, ao melhorar as condições de vida de populações em situação de vulnerabilidade econômica, ilustra o potencial da eficiência energética para contribuir com os ODS 1 (Erradicação da Pobreza), ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) e ODS 7 (Energia Acessível e Limpa). Contudo, apesar de seus benefícios, muitas dessas soluções ainda permanecem inacessíveis às populações de baixa renda (Ameli; Brandt, 2015), o que evidencia a necessidade de políticas públicas e mecanismos de financiamento inclusivos.

No âmbito industrial, a eficiência energética é elemento-chave para o aumento da competitividade e da sustentabilidade das empresas (Mohlala *et al.*, 2023), pois permite a redução de custos operacionais, o uso racional dos recursos e a mitigação dos impactos ambientais. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o setor industrial foi responsável por 37,3% do consumo total de energia elétrica no Brasil em 2022, consolidando-se historicamente como o segmento de maior demanda energética do país. Apesar dessa relevância, as práticas sistematizadas de eficiência energética ainda não são adotadas na intensidade necessária para gerar transformações estruturais.

A transformação digital e o advento das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 - como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva e Sistemas Ciberfísicos - abrem novas oportunidades para ampliar a eficiência energética e operacional das indústrias (Ahmad *et al.*, 2021; May; Kiritsis, 2021; Mohlala; Mabhele; Chauke, 2023). A integração entre tecnologia e sustentabilidade pode impulsionar ganhos expressivos de produtividade, rastreabilidade e automação inteligente (Schlipf; Meyer; Pana, 2021), alinhando-se diretamente aos ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

Dessa forma, este capítulo tem como objetivo contribuir para a promoção da eficiência energética industrial por meio da elaboração de diretrizes estratégicas fundamentado nas tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Busca-se identificar caminhos tecnológicos e de gestão que apoiem uma transição energética justa, sustentável e competitiva, alinhada aos princípios da Agenda 2030, reforçando o papel da inovação e da transformação digital como vetores de sustentabilidade econômica, ambiental e social.

Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é demonstrar que a implementação das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 pode promover melhorias significativas na eficiência energética do setor industrial, contribuindo para uma produção mais inteligente, sustentável e competitiva.

Busca-se realizar uma análise abrangente das estratégias, ferramentas e práticas que viabilizam essa integração tecnológica, evidenciando seus impactos nos âmbitos econômico, ambiental e operacional. Pretende-se, assim, oferecer um referencial que auxilie organizações industriais na formulação de planos e diretrizes de transição digital e energética, orientados pela inovação e pela sustentabilidade.

REVISÃO DA LITERATURA

Eficiência energética

Yergin (2012) refere-se à eficiência energética e à conservação de energia como termos intercambiáveis. No entanto, a literatura especializada apresenta diferentes abordagens conceituais para o termo “eficiência energética”, muitas vezes associando-o à ideia de conservação de energia.

Segundo Croucher (2011), a conservação de energia consiste na redução do consumo de energia por meio da diminuição do uso de bens e serviços que demandam eletricidade - por exemplo, retirar da tomada um aparelho eletrônico quando não está em uso, em vez de deixá-lo em modo stand-by. Assim, a conservação de energia está relacionada a decisões de uso e comportamento que resultam na diminuição da quantidade total de energia necessária..

De acordo com Schwarz (2018), conservar energia significa economizar combustível utilizando menos produtos e serviços que consomem energia. Para Oikonomou *et al.* (2009), a conservação é obtida principalmente por meio de mudanças comportamentais dos consumidores. Já Marques *et al.* (2006) definem a conservação de energia como um conceito socioeconômico, sustentado por duas ferramentas fundamentais: a mudança de hábitos e a eficiência energética.

Desde o Protocolo de Quioto, a eficiência energética tem ganhado espaço nas agendas políticas dos países desenvolvidos, por estar diretamente associada às políticas de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e aos benefícios econômicos e ambientais decorrentes da redução do consumo de energia.

De acordo com a International Energy Agency (IEA), entre os anos de 2000 e 2011 as emissões globais de dióxido de carbono aumentaram 44% (Ameli; Brandt, 2015; IEA, 2013). Ainda segundo a IEA (2023), em 2020 as emissões de CO₂ provenientes da combustão de energia e de processos industriais diminuíram em mais de 5% devido à pandemia de COVID-19. Entretanto, com a retomada econômica e a vacinação, em 2021 as emissões voltaram aos níveis anteriores, registrando aumento superior a 6%. Já em 2022 observou-se novo crescimento, de 0,9% (equivalente a 321 Mt), totalizando 36,8 Gt de emissões globais de CO₂.

Indústria 4.0

O termo Indústria 4.0 surgiu pela primeira vez em abril de 2011 durante a Feira Industrial de Hannover, na Alemanha. Desde então, passou a ser amplamente utilizado para designar o conceito de “produção do futuro” (Zuehlke, 2019; Coelho, 2016).

O termo está associado ao projeto “Plattform Industrie 4.0” (Plataforma Indústria 4.0), que tinha como objetivo desenvolver tecnologias avançadas capazes de permitir a comunicação e a troca de informações entre máquinas, sistemas e seres humanos, promovendo a integração e a otimização de todo o processo produtivo (Sacomano *et al.*, 2018; Zuehlke, 2019).

Assim como as revoluções industriais anteriores, a Quarta Revolução Industrial transformou profundamente os sistemas de produção, alterando também a natureza do trabalho. Essa transformação impulsionou uma transição do trabalho predominantemente manual para o trabalho intelectual e cognitivo, exigindo novas competências e qualificações profissionais.

Em resposta a essas mudanças, nas décadas de 1980 e 1990, diversas organizações criaram Universidades Corporativas (UCs) como estratégia de capacitação contínua de seus colaboradores (Meister, 1999). Anos depois, Freire *et al.* (2016) corroboraram as observações de Meister (1999), destacando que o propósito das universidades corporativas era suprir lacunas na formação acadêmica tradicional, estruturando áreas específicas de Educação Corporativa voltadas à formação e ao aperfeiçoamento permanente da força de trabalho (Meister, 1999; Freire *et al.*, 2016).

Tecnologias Habilitadoras ou Disruptivas

De acordo com o Department of Industry, Innovation, Science, Research and Tertiary Education (2012), uma tecnologia habilitadora, também conhecida como tecnologia disruptiva, é aquela que possui o potencial de promover uma transformação significativa nas capacidades de um indivíduo, organização ou cultura, possibilitando o desenvolvimento de novos produtos, bem como a criação de serviços e processos mais eficientes. Essas tecnologias atuam como catalisadores de inovação, impulsionando mudanças estruturais nos sistemas produtivos e possibilitando o avanço de novas fronteiras tecnológicas.

No contexto da Indústria 4.0, há diferentes interpretações e classificações quanto às tecnologias consideradas habilitadoras. Para Dalmarco *et al.* (2019), a Indústria 4.0 é sustentada por nove tecnologias fundamentais, que formam a base de seu ecossistema digital e produtivo: Simulação, Big Data, Computação em Nuvem (*Cloud Computing*), Sistemas Ciberfísicos (*Cyber-Physical Systems* – CPS), Segurança Cibernética (*Cybersecurity*), Robótica Colaborativa, Realidade Aumentada, Manufatura Aditiva (Impressão 3D), e Integração de Sistemas.

Nesse sentido, compreender o papel das tecnologias habilitadoras é essencial para delinear diretrizes estratégicas que orientem a transição da indústria tradicional para modelos produtivos inteligentes, sustentáveis e energeticamente eficientes, alinhados aos princípios da Indústria 4.0 e da transição energética global.

METODOLOGIA

A presente pesquisa adota a estratégia de estudo de caso, especificamente o estudo multicasos. A pesquisa está estruturada em três partes, abrangendo a descrição das tecnologias habilitadoras, a análise dos casos e, por fim, a elaboração de diretrizes de eficiência energética na Indústria 4.0.

Para a condução do estudo de caso, foram selecionados nove casos que atendem ao pré-requisito de apresentarem a adoção efetiva de alguma tecnologia

relacionada ao setor industrial. A escolha dos casos não se restringiu a uma tecnologia ou segmento industrial específico, o que permitiu uma abordagem mais abrangente e representativa das aplicações das tecnologias habilitadoras em diferentes contextos produtivos.

Durante a análise dos casos, observou-se que as tecnologias adotadas se manifestavam predominantemente em produtos e soluções desenvolvidos por empresas fornecedoras de tecnologia. Por esse motivo as referências a tais soluções serão apresentadas sob o termo “produtos aplicados”, uma vez que representam a materialização prática das tecnologias habilitadoras em contextos industriais reais.

Com base nos dados obtidos sobre a correlação entre os benefícios gerados pelos produtos aplicados e as tecnologias habilitadoras associadas, foi possível desenvolver diretrizes da Eficiência Energética na Indústria 4.0, contemplando as principais oportunidades, desafios e tendências de integração tecnológica voltadas à gestão energética.

As tecnologias habilitadoras descritas foram selecionadas de acordo com sua relevância e frequência de aplicação nos casos analisados. Destaca-se, contudo, que o conjunto de tecnologias abordado não esgota o universo das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, existindo outras de igual importância que, embora não mencionadas, permanecem essenciais para a transformação digital e energética do setor industrial.

ESTUDO DE CASO

O estudo de caso tem como finalidade demonstrar de que forma as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem contribuir para a promoção da eficiência energética no contexto industrial.

A pesquisa original foi estruturada em três etapas principais, cada uma correspondente a um estágio específico do processo de análise. Na primeira etapa, realizou-se a contextualização dos nove casos selecionados, incluindo a descrição das empresas clientes, das empresas fornecedoras dos produtos aplicados, dos produtos adotados e dos benefícios resultantes de sua implementação. Essa fase teve como propósito oferecer uma visão abrangente dos contextos organizacionais e tecnológicos nos quais cada caso está inserido.

Na segunda etapa, foi conduzida a análise individual de cada caso, considerando múltiplos fatores: os dados fornecidos pelos estudos de caso, as especificações técnicas dos produtos aplicados e os benefícios e resultados obtidos a partir de sua utilização. Essa análise permitiu a identificação de padrões de desempenho e impacto energético entre os diferentes casos. A partir dos resultados, observou-se similaridade entre os benefícios proporcionados pelos produtos aplicados e as características associadas às tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

Com base nessa constatação, a terceira etapa, que constitui o foco deste estudo, apresenta uma correlação entre os dados analisados e as características

específicas das tecnologias habilitadoras. Essa correlação possibilitou a identificação das tecnologias efetivamente incorporadas aos produtos aplicados em cada caso, evidenciando as relações entre inovação tecnológica e eficiência energética.

A seguir, são apresentadas as tecnologias habilitadoras identificadas nos produtos analisados, estabelecendo a base analítica para a elaboração das diretrizes da eficiência energética na Indústria 4.0.

Identificação das Tecnologias Habilitadoras

A partir da correlação estabelecida entre os benefícios observados e as características das tecnologias habilitadoras, verificou-se que tais tecnologias estão efetivamente incorporadas aos produtos aplicados nos diferentes casos analisados.

As tecnologias habilitadoras identificadas como presentes nos produtos aplicados são apresentadas a seguir, evidenciando sua contribuição direta para a melhoria da eficiência energética, bem como para a modernização e integração dos processos industriais no contexto da Indústria 4.0.

Tabela 1 – Identificação das tecnologias habilitadoras.

Tecnologias Habilitadoras	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
Computação em nuvem	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Inteligência artificial	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Manufatura Digital	X		X		X				X
Big data	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Machine-to-Machine	X	X	X	X	X	X	X		X
Tecnologia RFID				X				X	
Internet das coisas	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: elaborada pela autora.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação Inicial

Esta etapa compreende uma análise preliminar das operações industriais, com o propósito de compreender o perfil atual de consumo de energia, identificar pontos de ineficiência e estabelecer uma linha de base que sirva de referência para a mensuração da eficiência energética ao longo do processo de melhoria.

Identifique a situação atual de eficiência energética

A identificação da situação atual de eficiência energética na indústria constitui uma etapa fundamental para o diagnóstico e o planejamento de ações de melhoria. Esse processo envolve a coleta sistemática de dados sobre o consumo energético,

a realização de auditorias energéticas, a avaliação dos processos produtivos e a implementação de sistemas de monitoramento em tempo real, complementados pela análise de custos e desempenho operacional.

A comparação dos resultados obtidos com padrões e benchmarks setoriais permite identificar ineficiências, como equipamentos obsoletos, sistemas de controle inadequados ou práticas operacionais de alto consumo. Além disso, é essencial avaliar a viabilidade de integração de fontes renováveis de energia e promover o engajamento dos colaboradores, de modo a consolidar uma cultura organizacional orientada à eficiência e à sustentabilidade.

Essas ações oferecem uma base sólida para a construção de diretrizes de eficiência energética, com metas realistas, indicadores de desempenho (KPIs) e mecanismos de acompanhamento contínuo.

As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 desempenham papel estratégico nessa etapa diagnóstica:

- a) IoT (Internet of Things) e Machine-to-Machine (M2M): permitem a coleta em tempo real de dados sobre o consumo de energia e o desempenho dos equipamentos industriais.
- b) Big Data Analytics: possibilita a análise avançada dos dados coletados, identificando padrões, ineficiências e oportunidades de otimização energética.
- c) Computação em Nuvem (Cloud Computing): viabiliza o armazenamento e o acesso remoto a grandes volumes de dados, favorecendo a integração entre unidades e sistemas.
- d) Manufatura Digital: permite a execução de análises, simulações e visualizações tridimensionais (3D), apoiando a definição simultânea de processos e produtos com foco em eficiência.
- e) Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning: promovem a comunicação autônoma entre dispositivos inteligentes, possibilitando decisões colaborativas e preditivas sem intervenção humana direta.
- f) Tecnologia RFID (Radio Frequency Identification): utilizada para rastreamento, identificação e registro automatizado de dados de ativos e fluxos energéticos por meio de radiofrequência.

Em conjunto, essas tecnologias fortalecem a capacidade analítica e operacional das indústrias, permitindo um diagnóstico energético preciso, condição indispensável para a gestão estratégica da eficiência energética e para a sustentabilidade alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 9, 12 e 13).

Determine os principais desafios e oportunidades

A identificação dos principais desafios e oportunidades constitui uma etapa estratégica no planejamento das ações voltadas à eficiência energética industrial. Essa análise permite compreender as limitações que dificultam a adoção de práticas sustentáveis, bem como reconhecer os potenciais de melhoria e inovação tecnológica disponíveis.

Entre os principais desafios, destacam-se o alto consumo energético, a obsolescência de equipamentos e sistemas, a ausência de políticas internas de gestão energética e a falta de conscientização dos colaboradores sobre o uso racional de energia. Soma-se a esses fatores a escassez de investimentos iniciais e a dificuldade de integração entre sistemas legados e novas tecnologias digitais.

Por outro lado, as oportunidades associadas à eficiência energética abrangem a incorporação de tecnologias inovadoras, a redução de custos operacionais no longo prazo, o fortalecimento da sustentabilidade corporativa, o acesso a incentivos governamentais e linhas de financiamento verdes, o cumprimento de metas ambientais globais e o aumento da competitividade industrial. A identificação e o balanceamento desses fatores são essenciais para priorizar áreas de intervenção nas diretrizes de eficiência energética, buscando o equilíbrio entre custos, benefícios e responsabilidade ambiental.

As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 desempenham papel decisivo nesse processo, oferecendo ferramentas que auxiliam tanto na mitigação dos desafios quanto na potencialização das oportunidades:

- a) Cloud Computing: permite o armazenamento e o acesso remoto a dados energéticos e operacionais, facilitando o controle e a tomada de decisão em tempo real.
- b) Machine Learning e Inteligência Artificial (IA): possibilitam a análise preditiva e a identificação de padrões de consumo, otimizando continuamente os processos e as tecnologias empregadas.
- c) Internet das Coisas (IoT) e Machine-to-Machine (M2M): proporcionam o monitoramento inteligente de máquinas e equipamentos, permitindo manutenções preditivas e a substituição de ativos obsoletos.
- d) RFID (Radio Frequency Identification): utilizada para rastrear e identificar ativos, produtos e equipamentos, permitindo o monitoramento contínuo de suas condições operacionais.
- e) Big Data Analytics: contribui para a avaliação do custo e do potencial de economia de energia em diferentes tecnologias e cenários operacionais.
- f) Manufatura Digital: apoia a otimização de processos e o aumento da produtividade por meio de simulações e modelagem digital integrada.

A integração dessas tecnologias viabiliza uma visão sistêmica da gestão energética industrial, favorecendo a identificação de gargalos, a criação de soluções inovadoras e o alinhamento das práticas corporativas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 9, 12 e 13), que promovem o uso eficiente da energia, a inovação responsável e a mitigação dos impactos climáticos..

Estabeleça metas claras para a redução do consumo de energia

O estabelecimento de metas claras e mensuráveis para a redução do consumo de energia é essencial para orientar e consolidar as ações de eficiência energética nas organizações industriais. Essas metas devem ser específicas, mensuráveis,

alcançáveis, relevantes e temporais, permitindo um acompanhamento contínuo e transparente dos resultados obtidos.

A definição de objetivos deve considerar o perfil energético da empresa, as características dos processos produtivos, os indicadores de desempenho (KPIs) previamente identificados e as políticas ambientais e corporativas vigentes. Além disso, é fundamental que essas metas sejam comunicadas de forma ampla a todos os níveis organizacionais, assegurando o engajamento das equipes e o comprometimento da alta gestão.

As metas devem ser monitoradas, revisadas e atualizadas periodicamente, de modo a refletir avanços tecnológicos, mudanças nas condições operacionais e novos requisitos regulatórios.

Ao direcionar esforços de forma estruturada e orientada por resultados, a indústria fortalece sua maturidade energética, amplia sua eficiência operacional e contribui efetivamente para uma transição energética justa e sustentável.

Identificação de Tecnologias Habilitadoras

Nesta etapa, realiza-se a identificação e seleção das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 que podem ser aplicadas de forma estratégica para otimizar o uso de energia e aumentar a eficiência dos processos industriais. A escolha adequada dessas tecnologias é essencial para promover a integração digital, a automação inteligente e a tomada de decisão baseada em dados.

Entre as tecnologias com maior potencial para a gestão energética avançada, destacam-se:

- a) Internet das Coisas (IoT) e sensores inteligentes, que possibilitam o monitoramento contínuo e em tempo real do consumo de energia, identificando desvios, perdas e oportunidades de economia.
- b) Análise de Dados (Data Analytics) e Big Data, que permitem a interpretação de grandes volumes de informações energéticas e operacionais, gerando insights para o aprimoramento da eficiência e o planejamento energético estratégico.
- c) Automação Industrial e Sistemas Ciberfísicos, que integram máquinas, dispositivos e sistemas de controle, permitindo operações autônomas e responsivas às variáveis de consumo energético.
- d) Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning (ML), que viabilizam modelos preditivos para otimização de processos, detecção de anomalias e ajuste dinâmico da demanda energética.
- e) Computação em Nuvem (Cloud Computing), que facilita o armazenamento, o compartilhamento e a análise colaborativa de dados energéticos de diferentes plantas e unidades produtivas.
- f) Manufatura Digital e Simulação 3D, utilizadas para modelar e avaliar cenários de eficiência, reduzindo desperdícios e otimizando o ciclo de vida dos sistemas produtivos.

A identificação dessas tecnologias deve considerar tanto o nível de maturidade digital da organização quanto os recursos disponíveis para implementação.

Pesquise e identifique tecnologias disponíveis que podem ajudar a melhorar a eficiência energética na indústria

A pesquisa e identificação de tecnologias voltadas à eficiência energética na indústria constituem uma etapa essencial para a construção de estratégias eficazes de transição digital e sustentável. Esse processo envolve o levantamento sistemático das soluções tecnológicas disponíveis, considerando sua aplicabilidade, maturidade e custo-benefício.

A metodologia inclui a revisão da literatura técnica e científica, a consulta a especialistas e fornecedores de tecnologia, e a análise comparativa entre alternativas, levando em conta aspectos como potencial de economia de energia, retorno sobre o investimento (ROI) e compatibilidade com os processos existentes.

Além disso, a análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental deve orientar a priorização das tecnologias mais adequadas para cada contexto industrial. A implementação planejada e o monitoramento contínuo de desempenho energético são fundamentais para garantir que os objetivos estabelecidos sejam atingidos.

Considere tecnologias relacionadas a geração, distribuição, armazenamento, monitoramento e controle de energia

A análise das tecnologias aplicáveis à geração, distribuição, armazenamento, monitoramento e controle de energia abrange todo o ciclo energético industrial, possibilitando uma visão integrada e otimizada do uso dos recursos energéticos.

No âmbito da geração de energia, destacam-se soluções baseadas em fontes renováveis, como solar fotovoltaica, eólica e biomassa, que contribuem para a redução da dependência de fontes fósseis. Em relação à distribuição, o uso de redes inteligentes (Smart Grids) e sistemas automatizados de gerenciamento de carga permite maior confiabilidade e eficiência na entrega de energia.

Para o armazenamento, tecnologias como baterias de íon-lítio, supercapacitores e sistemas de armazenamento térmico oferecem flexibilidade e estabilidade ao sistema energético, especialmente em ambientes industriais com alta variabilidade de demanda.

Os sistemas de monitoramento e controle energético, por sua vez, utilizam IoT, sensores inteligentes, análise de dados em tempo real e inteligência artificial, permitindo o acompanhamento contínuo do consumo e a detecção automática de anomalias.

Desenvolvimento e Implementação

Nesta etapa, as tecnologias priorizadas são desenvolvidas, integradas e implementadas nas operações industriais com o objetivo de otimizar o uso de

energia e maximizar a eficiência operacional. O processo de implantação deve ser cuidadosamente planejado, garantindo interoperabilidade entre sistemas, segurança de dados e adesão dos usuários aos novos processos digitais.

Entre as principais tecnologias aplicáveis à fase de implementação destacam-se:

- a) IoT (Internet of Things) e Sensores Inteligentes: possibilitam o monitoramento em tempo real do desempenho energético dos equipamentos e sistemas produtivos, identificando desvios e oportunidades de melhoria imediata.
- b) Blockchain: viabiliza o rastreamento da proveniência da energia e das transações energéticas, assegurando transparência, confiabilidade e rastreabilidade na gestão dos recursos.
- c) RFID (Radio Frequency Identification): permite o rastreamento de máquinas, produtos e componentes, contribuindo para inspeções automatizadas e controle de ativos energéticos.
- d) Computação em Nuvem (Cloud Computing): oferece infraestrutura para armazenamento, processamento e visualização em tempo real de dados sobre consumo e desempenho energético.
- e) Internet das Coisas (IoT) e Comunicação Machine-to-Machine (M2M): favorecem a conectividade entre máquinas e sistemas, possibilitando a coleta automatizada de dados e a otimização colaborativa de processos.
- f) Big Data e Analytics: permitem a análise avançada de grandes volumes de dados, gerando insights detalhados sobre padrões de consumo, eficiência e oportunidades de redução de desperdícios.
- g) Manufatura Digital: possibilita a visualização, simulação e análise detalhada dos processos produtivos, promovendo a identificação de gargalos energéticos e a otimização dos fluxos de trabalho.

A integração dessas tecnologias resulta em sistemas industriais inteligentes, capazes de atuar de forma autônoma, responsiva e sustentável..

Crie um cronograma que detalhe a implementação das tecnologias ao longo do tempo

A criação de um cronograma detalhado de implementação é fundamental para garantir o planejamento eficiente e o controle das etapas de implantação das tecnologias de eficiência energética.

Esse cronograma deve contemplar:

- i. A divisão do processo em etapas e atividades específicas;
- ii. A definição de marcos (milestones) e metas de curto, médio e longo prazo;
- iii. A estimativa de duração e sequência das tarefas;
- iv. A alocação de recursos humanos, financeiros e tecnológicos;
- v. A atribuição de responsabilidades entre as equipes envolvidas;

vi. O monitoramento contínuo e atualização periódica conforme o progresso do projeto.

Um cronograma bem estruturado assegura clareza, orientação e comunicação eficaz durante todo o processo, além de permitir o acompanhamento do progresso e a correção tempestiva de desvios, aumentando as chances de sucesso da iniciativa.

Divida a implementação em fases ou etapas, estabelecendo marcos e prazos específicos

A divisão da implementação em fases e marcos de execução constitui uma abordagem metodológica essencial para o gerenciamento eficiente de projetos de eficiência energética.

Cada fase deve possuir objetivos específicos, entregas definidas e prazos realistas, possibilitando uma execução controlada e incremental. Normalmente, o processo pode ser estruturado em quatro etapas principais:

- i. Planejamento e Preparação: definição do escopo, seleção das tecnologias e adequação da infraestrutura.
- ii. Implementação Piloto: aplicação em pequena escala para validação técnica e operacional.
- iii. Escalonamento: expansão das soluções comprovadas para toda a planta industrial.
- iv. Monitoramento e Melhoria Contínua: acompanhamento dos resultados e ajustes contínuos com base em dados e feedbacks operacionais.

Essa estrutura permite gestão ativa do progresso, mitigação de riscos e garantia de cumprimento dos objetivos estabelecidos nas diretrizes energéticas, promovendo uma trajetória consistente rumo à transformação digital sustentável.

Implementação e Testes Piloto

Antes da adoção em larga escala, é fundamental realizar testes piloto para avaliar a eficácia e a viabilidade das tecnologias em um ambiente controlado e representativo das condições reais de operação.

Os projetos piloto permitem identificar ajustes técnicos, validar parâmetros operacionais e reduzir riscos de falhas durante a fase de implantação definitiva. Essa etapa também serve como um laboratório de aprendizagem organizacional, possibilitando a coleta de dados, o aprimoramento das práticas de gestão e o desenvolvimento de competências técnicas.

A realização de testes piloto é uma prática recomendada para consolidar as diretrizes de eficiência energética, assegurando que a implementação das tecnologias ocorra de forma gradual, mensurável e sustentável.

Comece a implementar as tecnologias de forma faseada, começando por testes piloto para avaliar seu desempenho na operação real

A implementação faseada das tecnologias de eficiência energética, iniciando por testes piloto, é uma estratégia que permite avaliar o desempenho real das soluções tecnológicas antes de sua aplicação em toda a planta industrial.

Esse processo deve envolver as seguintes etapas:

- i. Seleção criteriosa das tecnologias e definição dos objetivos do teste;
- ii. Elaboração de um plano piloto detalhado, contemplando escopo, indicadores de desempenho e critérios de sucesso;
- iii. Coleta e análise sistemática de dados, com uso de ferramentas digitais v. para mensuração e acompanhamento;
- iv. Avaliação do desempenho energético e operacional das tecnologias testadas;
- v. Identificação de ajustes e oportunidades de otimização, com base nos resultados obtidos;
- vi. Tomada de decisão fundamentada sobre a viabilidade da expansão do projeto para toda a operação.

As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 têm papel fundamental na execução e análise dos testes piloto:

- a) Cloud Computing: viabiliza o armazenamento e análise centralizada de dados coletados durante os testes, facilitando o compartilhamento e a tomada de decisão.
- b) IoT e Machine-to-Machine (M2M): permitem o monitoramento em tempo real das variáveis operacionais e do consumo energético dos sistemas em teste.
- c) Machine Learning (ML) e Inteligência Artificial (IA): realizam a análise de dados históricos e preditivos, identificando ineficiências e padrões de desempenho.
- d) RFID: possibilita o rastreamento em tempo real de equipamentos, produtos e ativos durante os testes, garantindo controle e confiabilidade dos dados.
- e) Big Data Analytics: processa grandes volumes de informações, gerando insights estratégicos para ajustes e aperfeiçoamentos dos projetos piloto.
- f) Manufatura Digital: permite a simulação virtual de cenários e processos, antecipando resultados e reduzindo custos e riscos de implementação.

A adoção dessa abordagem estruturada garante aprendizado organizacional contínuo, reduz custos de transição tecnológica e aumenta a eficiência e a confiabilidade da implementação. Assim, os testes piloto tornam-se um instrumento essencial para a inovação sustentável e a transformação digital responsável no setor industrial.

Ajustes e Otimização

Com base nos resultados obtidos nos testes piloto e nas informações provenientes do monitoramento contínuo, esta etapa dedica-se à realização de ajustes e otimizações nas tecnologias, processos e estratégias de gestão energética.

O objetivo é aperfeiçoar o desempenho operacional, corrigir ineficiências identificadas e maximizar os ganhos de eficiência energética, garantindo que as soluções tecnológicas implantadas atinjam o mais alto nível de eficácia e sustentabilidade.

A prática de ajustes e otimizações contínuas é um dos pilares da Indústria 4.0, pois reforça o ciclo de melhoria contínua (PDCA – Plan, Do, Check, Act) e promove a evolução adaptativa dos sistemas industriais.

Com base nos resultados dos testes piloto, faça ajustes e otimizações nas diretrizes e nas tecnologias implementadas

A otimização pós-implementação deve ser conduzida de forma estruturada, considerando os dados coletados nos testes piloto e nas fases iniciais de operação das tecnologias de eficiência energética.

O processo envolve as seguintes etapas:

- i. Análise detalhada dos dados e resultados obtidos nos testes piloto, com foco em desempenho, consumo e retorno energético;
- ii. Identificação de áreas críticas onde o desempenho ficou abaixo das expectativas;
- iii. Revisão de feedbacks da equipe técnica, usuários e partes interessadas envolvidas;
- iv. Investigação das causas-raiz de falhas ou ineficiências, utilizando metodologias de análise de causa (como Diagrama de Ishikawa ou 5 Porquês);
- v. Ajustes nos parâmetros tecnológicos e otimização de processos produtivos;
- vi. Atualização das diretrizes de implementação, refletindo as melhorias incorporadas e as novas metas energéticas;
- vii. Reavaliação dos indicadores de desempenho (KPIs) e adequação das metas de eficiência energética conforme os resultados obtidos.

A aplicação dessa abordagem iterativa promove um ambiente de aprendizagem contínua, no qual as decisões são orientadas por dados e evidências. Isso assegura a evolução progressiva do sistema energético-industrial, aumentando sua resiliência, competitividade e sustentabilidade no longo prazo.

Escalonamento e Expansão

Após a validação das tecnologias e processos em projetos piloto, inicia-se a fase de escalonamento e expansão, em que as soluções de eficiência energética bem-sucedidas são ampliadas para abranger outras áreas da organização ou múltiplas unidades industriais.

Essa etapa requer planejamento estratégico, coordenação interdepartamental e monitoramento contínuo, assegurando que as práticas e tecnologias otimizadas sejam replicadas de forma consistente e sustentável. O escalonamento deve considerar as diferenças operacionais, estruturais e culturais entre as unidades, garantindo a adaptação local sem comprometer a padronização dos resultados.

A expansão sistemática das soluções tecnológicas consolida os ganhos obtidos, fortalece a governança energética corporativa.

Uma vez que as tecnologias estejam comprovadas e otimizadas, expanda sua implementação para toda a indústria

Uma vez comprovadas e otimizadas, as tecnologias de eficiência energética devem ser expandidas gradualmente para toda a organização, por meio de um plano de implementação estruturado, orientado a resultados e à melhoria contínua.

O processo de expansão envolve:

- i. Definição de metas claras e indicadores de desempenho para a nova fase de implementação;
- ii. Escalonamento gradual das soluções, iniciando pelas unidades com maior potencial de impacto energético;
- iii. Treinamento e capacitação ampliada das equipes envolvidas;
- iv. Comunicação efetiva e engajamento dos stakeholders, assegurando adesão institucional;
- v. Monitoramento contínuo e avaliação de desempenho, com ajustes em tempo real;
- vi. Documentação dos resultados e lições aprendidas, para consolidar práticas e facilitar replicações futuras.

As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 oferecem suporte essencial a essa fase de expansão:

- a) Blockchain: garante integridade, rastreabilidade e transparência em toda a cadeia de implementação, assegurando a confiabilidade dos dados e processos.
- b) Cloud Computing: proporciona integração e colaboração global, viabilizando o acesso seguro e econômico às informações em múltiplas unidades.
- c) Machine Learning (ML) e Inteligência Artificial (IA): automatizam a otimização e o ajuste contínuo dos processos, com análise de imagens, detecção de anomalias e suporte à decisão.
- d) Internet das Coisas (IoT) e Machine-to-Machine (M2M): permitem o monitoramento em tempo real, manutenção preditiva, gestão inteligente de ativos e integração entre sistemas distribuídos.
- e) RFID: facilita a gestão automatizada de inventários e ativos, prevenindo perdas e promovendo rastreabilidade operacional.

f) Big Data Analytics: fornece análises preditivas e insights estratégicos para otimização operacional e inovação contínua.

g) Manufatura Digital: possibilita simulação avançada e gestão do ciclo de vida do produto, contribuindo para eficiência operacional, redução de resíduos e sustentabilidade industrial.

A aplicação coordenada dessas tecnologias em escala ampliada consolida o modelo de gestão energética inteligente, reforçando o compromisso da organização com a transformação digital, a sustentabilidade e a competitividade global.

Discussões

A comunicação estruturada e o relato sistemático dos resultados constituem etapas essenciais para a consolidação e o sucesso das diretrizes de eficiência energética no contexto da Indústria 4.0. A troca contínua de informações entre gestores, equipes técnicas, parceiros tecnológicos e órgãos reguladores é fundamental para assegurar transparência, engajamento e alinhamento estratégico ao longo de todo o processo de implementação.

A utilização de plataformas digitais integradas, baseadas em computação em nuvem, Big Data Analytics e Inteligência Artificial (IA), possibilita que os indicadores de desempenho energético sejam monitorados em tempo real, automatizando a geração de relatórios e facilitando o compartilhamento de informações entre os diferentes níveis da organização. Essa abordagem promove uma tomada de decisão mais ágil, precisa e baseada em evidências, além de permitir a identificação precoce de desvios e oportunidades de melhoria contínua.

Os relatórios de desempenho energético devem contemplar aspectos técnicos, econômicos e ambientais, documentando não apenas os avanços obtidos, mas também os desafios enfrentados e as lições aprendidas durante a execução das diretrizes. A comunicação periódica desses resultados reforça o comprometimento institucional com a sustentabilidade, fortalece a confiança dos stakeholders e contribui para o aperfeiçoamento da governança energética corporativa.

Adicionalmente, o uso de dashboards interativos e sistemas inteligentes de visualização de dados potencializa a transparência organizacional e democratiza o acesso às informações, fomentando uma cultura organizacional orientada por dados (data-driven). Essa cultura é indispensável para a manutenção de programas de eficiência energética sustentáveis, o aperfeiçoamento contínuo dos processos industriais e o alinhamento das práticas empresariais às metas globais de descarbonização e inovação tecnológica.

Portanto, a comunicação efetiva e a elaboração sistemática de relatórios regulares vão além de uma exigência documental: constituem um instrumento estratégico de gestão, essencial para assegurar a coerência entre resultados e objetivos, consolidando um ciclo virtuoso de monitoramento, aprendizado e aprimoramento contínuo da eficiência energética na Indústria 4.0.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa evidenciou que a integração entre digitalização, automação e análise avançada de dados constitui o eixo central para o avanço da eficiência energética. Tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Big Data Analytics, Inteligência Artificial (IA), Computação em Nuvem, Machine-to-Machine (M2M), RFID e Manufatura Digital mostraram-se determinantes para o monitoramento, controle e otimização do consumo energético nas operações industriais.

Por meio da análise de múltiplos casos e da correlação entre benefícios observados e características tecnológicas, foi possível confirmar que essas soluções estão efetivamente incorporadas em produtos e processos industriais, resultando em ganhos expressivos de produtividade, redução de desperdícios e mitigação de impactos ambientais. Esses resultados confirmam a hipótese de que a Indústria 4.0 não apenas moderniza o parque fabril, mas também redefine os paradigmas de eficiência energética e sustentabilidade.

A elaboração das diretrizes de eficiência energética mostrou-se um instrumento metodológico eficaz para estruturar o processo de transformação digital no setor industrial, permitindo identificar etapas-chave - desde o diagnóstico energético inicial até o escalonamento e otimização das soluções - e propor diretrizes práticas para organizações em diferentes níveis de maturidade tecnológica. O modelo proposto enfatiza a importância de uma abordagem integrada, que combine tecnologias digitais, capacitação humana, governança energética, comunicação estratégica e cultura organizacional orientada por dados (data-driven).

Os resultados obtidos demonstram que os benefícios das tecnologias habilitadoras ultrapassam a redução de custos operacionais. Elas promovem maior segurança de processos, previsibilidade, rastreabilidade, transparência e sustentabilidade ambiental, por meio da redução de emissões de carbono, diminuição de resíduos e uso racional de recursos naturais. Assim, a eficiência energética passa a ser compreendida como um vetor de inovação, competitividade e responsabilidade socioambiental, e não apenas como um instrumento de economia de energia.

Conclui-se, portanto, que a transformação digital da indústria é um caminho irreversível e essencial para o alcance das metas globais de descarbonização e desenvolvimento sustentável. A incorporação das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 deve ser entendida não apenas como uma evolução tecnológica, mas como uma estratégia sistêmica de transição energética, capaz de alinhar produtividade, inovação e responsabilidade ambiental em um mesmo ecossistema industrial.

Como perspectivas futuras, recomenda-se o aprofundamento dos estudos sobre indicadores inteligentes de desempenho energético, o uso de blockchain para rastreabilidade de energia limpa, e a integração entre políticas públicas e iniciativas empresariais que estimulem a digitalização sustentável e a inovação verde.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, T., Zhang, D., & Huang, C. (2021). *Applications of artificial intelligence in industrial energy management and optimization: A review*. Journal of Cleaner Production, 278, 123897.
- Ameli, N., & Brandt, N. (2015, maio). *What impedes household investment in energy efficiency and renewable energy?* OECD Economics Department Working Papers, 1222, 1–32. <https://doi.org/10.1787/18151973>
- Coelho, P. M. N. (2016). *Rumo à Indústria 4.0 [Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra]*. Faculdade de Ciências e Tecnologia. <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/36992/1/Tese%20Pedro%20Coelho%20Rumo%20%c3%a0%20Industria%204.0.pdf>
- Croucher, M. (2011, outubro). *Potential problems and limitations of energy conservation and energy efficiency*. Energy Policy, 39(10), 5795–5799. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.011>
- Dalmarco, G., et al. (2019). *Providing industry 4.0 technologies: The case of a production technology cluster*. The Journal of High Technology Management Research, 30(2). <https://doi.org/10.1016/j.hitech.2019.100355>
- Department of Industry Innovation Science Research and Tertiary Education. (2012). *Enabling technology futures: A survey of the Australian technology landscape*.
- Freire, P. S., et al. (2016). *Universidade corporativa em rede: Considerações iniciais para um novo modelo de educação corporativa*. Revista Espacios, 37(5).
- IEA. (2023). *CO2 emissions in 2022*. IEA. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- IEA. (2013). *CO2 emissions from fuel combustion: Highlights*. Soregraph.
- Marques, M. C., Haddad, J., & Martins, A. R. S. (2006). *Conservação de energia: Eficiência energética de equipamentos e instalações (3ª ed.)*. Universidade Federal de Itajubá FUPAI; Eletrobrás / Procel Educação.
- May, G., & Kiritsis, D. (2021). *A framework for the implementation of digitalized energy management systems based on ISO 50001 and Industry 4.0*. Journal of Manufacturing Systems, 59, 336–351.
- Meister, J. C. (1999). *Educação corporativa: A gestão do capital intelectual através das universidades corporativas*. Makron Books.
- Mohlala, T., Mabhele, B. K., & Chauke, J. (2023). *The impact of industry 4.0 on energy efficiency: A systematic literature review*. Sustainability, 15(1).
- Oikonomou, V., et al. (2009). *Energy saving and energy efficiency concepts for policy making*. Energy Policy, 37(11), 4787–4796.

Sacomano, J. B., et al. (2018). *Indústria 4.0: Conceitos e fundamentos*. Blucher. <https://books.google.com.br/books?id=PNCuDwAAQBAJ>

Schlipf, D., Meyer, J., & Pana, C. (2021). *Digital twin for energy management and optimization in manufacturing*. Procedia CIRP, 104, 1028–1033.

Schwarz, P. M. (2018). *Energy economics*. Routledge.

Yergin, D. (2012). *The quest: Energy, security, and the remaking of the modern world*. Penguin Books.

Zuehlke, D. (2019, jul./dez.). *Industry 4.0: More than a technological revolution*, 5(10), 9–10.